



Giovanni Pisanti

SERVICE LIFE DESIGN DI STRUTTURE IN C.A.
*PROPOSTA DI UN MODELLO PROBABILISTICO
MEDIANTE ANALISI MONTE CARLO*

*Tesi di Dottorato
XXIV ciclo*

*Il Coordinatore
Prof. Ing. Luciano ROSATI*

*Il Tutor
Prof. Ing. Renato IOVINO*

SERVICE LIFE DESIGN DI STRUTTURE IN C.A.

PROPOSTA DI UN MODELLO PROBABILISTICO MEDIANTE ANALISI MONTE CARLO

Copyright © 2008 Università degli Studi di Napoli Federico II – P.le Tecchio 80, 80136 Napoli, Italy –
web: www.unina.it

Proprietà letteraria, tutti i diritti riservati. La struttura ed il contenuto del presente volume non possono essere riprodotti, neppure parzialmente, salvo espressa autorizzazione. Non ne è altresì consentita la memorizzazione su qualsiasi supporto (magnetico, magnetico-ottico, ottico, cartaceo, etc.).

Benché l'autore abbia curato con la massima attenzione la preparazione del presente volume, Egli declina ogni responsabilità per possibili errori ed omissioni, nonché per eventuali danni dall'uso delle informazione ivi contenute.

Finito di stampare il 29/11/2011

INDICE GENERALE

INDICE GENERALE	i
SOMMARIO	ii
ABSTRACT	iv
RINGRAZIAMENTI	vi
About the author	vii
1 Introduzione	1
2 Fenomeni di degrado del c.a.	7
2.1 Degrado e durabilità	7
2.2 Processi di degrado per il calcestruzzo	10
2.3 Le classi di esposizione ambientale	11
3 Modelli deterministici	17
3.1 Corrosione indotta da cloruri presenti nell'acqua di mare - Ambienti XS	17
3.1.1 Misura del coefficiente di diffusione dei cloruri ..	23
3.2 Corrosione indotta da carbonatazione-Ambienti XC...	28
3.3 Corrosione indotta da effetti combinati	34
4 L'approccio probabilistico	37
4.1 Il modello proposto	37
4.2 Applicazione dell'analisi Monte Carlo	41
4.3 Confronto tra il modello deterministico ed il modello probabilistico.....	46
5 Impiego del modello proposto.....	57
5.1 Progetto del copriferro di strutture in c.a.	57
5.2 Valutazione della vita utile residua di strutture esistenti in c.a.	68
5.3 Prevenzione e protezione per le strutture in c.a.	69
5.3.1 Tecniche elettrochimiche	70
6 Conclusioni.....	71
6.1 Sviluppi futuri.	72
Bibliografia	75

SOMMARIO

Obiettivo del presente studio è quello di approfondire le conoscenze sul decadimento delle prestazioni del calcestruzzo nei processi di invecchiamento delle strutture in cemento armato e di fornire un modello probabilistico per il progetto della Vita Utile.

L'attenzione è stata posta principalmente allo stato di protezione delle barre di armatura, il copriferro, per calcestruzzi a faccia vista esposti alle condizioni di rischio previste per le classi ambientali XS e XC.

Sono stati esaminati i principali fattori che regolano la propagazione dei fenomeni di degrado a partire dalla superficie esterna dell'elemento in c.a. fino al raggiungimento delle condizioni limite, che definiscono la durata della vita utile dell'elemento stesso.

Si sono così ricavate tre leggi, di tipo deterministico, che forniscono la velocità di propagazione del fenomeno indagato, in funzione del tempo, rispettivamente per le tre condizioni ambientali considerate: corrosione indotta da cloruri presenti nell'acqua di mare, corrosione indotta da carbonatazione, effetti combinati indotti dalla presenza contemporanea di cloruri e carbonatazione.

L'elevato numero di fattori che condizionano i parametri richiamati dalle leggi ha spinto all'implementazione delle leggi deterministiche in un modello probabilistico, ottenuto mediante applicazioni ripetute del metodo Monte Carlo.

Il metodo Monte Carlo, appartenente alla famiglia dei metodi statistici non parametrici, è utile per superare i problemi computazionali legati ai test esatti che, per grandi campioni, generano un numero di permutazioni eccessivo.

Si basa su un algoritmo che genera una serie di numeri tra loro incorrelati, che seguono la distribuzione di probabilità associata al fenomeno da indagare, cercando di esplorare in modo denso tutto lo spazio dei parametri del fenomeno. L'efficienza di questo metodo aumenta rispetto agli altri metodi quando la dimensione del problema cresce.

Il modello proposto permette di combinare le leggi deterministiche con l'elevato numero di variabili (rappresentabili da distribuzioni normali) grazie a simulazioni di pseudo-test e restituisce la stima della vita utile dell'elemento in c.a. in termini di probabilità e deviazione standard.

Associando, quindi, al valore medio trovato il livello di confidenza scelto dal progettista durante l'analisi statistica, in genere 95% e quindi per un frattile al 5%, si concretizza la possibilità di attuare un approccio prestazionale, piuttosto che

prescrittivistico, per il progetto del copriferro associato alla vita utile attesa (Service Life Design) degli elementi strutturali in c.a.

Il modello probabilistico proposto è stato implementato in una procedura automatica che permette il dimensionamento rapido del copriferro, lasciando eventualmente aperta all'utente la possibilità di variare le distribuzioni normali associate ai parametri del modello. La procedura automatica inversa si applica, invece, a strutture esistenti integrata dall'utilizzo di strumenti di diagnostica non invasiva (pachometro): partendo dalla misura del copriferro dell'elemento indagato e considerate le opportune condizioni ambientali e al contorno è possibile stimarne, sempre con approccio probabilistico, la vita utile residua e programmare gli eventuali interventi di manutenzione che saranno, dunque, più rapidi, efficaci ed economici.

ABSTRACT

Final goals of this dissertation are the increasing the knowledge of reinforced concrete (RC) structures under ageing process and the providing of a stochastic model for a Service Life design.

The attention has been mainly focused on the protection layer of the steel bars, generally called cover, for concrete directly exposed to aggressive environmental and classified as XS and XC environment.

The primary factors have been investigated considering the propagation of degradation phenomena occurring from the external surface of the RC element to the achievement of a limit condition. Those factors define the Service Life of the element itself.

Three deterministic laws were elaborated. These equations provide the rate of the ageing propagation during the time respectively for the following three analyzed environmental exposures: corrosion due to chloride present in tide zone, corrosion due to carbonation, combined effects due to the contemporary present of chloride and carbonation.

Since the high number of factors that affect the parameters, the deterministic equations have been implemented using a probabilistic approach based on high number of applications of Monte Carlo method.

The Monte Carlo method belongs to the family of non-parametric statistical method. It is helpful tool to overcome computational problems connected to tests that generate an excessive number of permutations for high number of samples.

This method is based on an algorithm that generates a random distributions of number similar to the probable distributions connected to phenomena under investigation. The method reliability increases in comparison to others methods when the dimension of the problem increases as well.

The proposed method allows combining deterministic laws with a high number of variables (representable with normal distribution) using simulations of “pseudo-test”. As result the estimation of Service Life of the RC element in terms of probability and standard deviation is given.

Stochastic approach for the cover design and Service Life of RC members can be used instead of a deterministic approach using the average value of the level confidence chosen by the designer during the stochastic analysis, generally with a fractile equal to 95% of the maximum's population.

The proposed probabilistic model has been implemented with an automatic procedure that allows a rapid cover design leaving open the possibility to the user

to change the normal distribution connected to the model parameters. The inverse automatic procedure can be applied on existing structures and integrated with non-destructive evaluation methods: the residue Service Life can be estimated with a probabilistic approach starting from the cover measurement of the investigated element and considered the environmental conditions. This procedure helps to schedule faster, more effective and economical maintenance work.

Capitolo 1

Introduzione

In meno di un secolo di vita il conglomerato cementizio armato, comunemente noto come calcestruzzo armato (c.a.), si è rilevato essere un materiale strutturale con una durata nel tempo ben limitata e, soprattutto, ben inferiore a quanto si è ritenuto fino agli anni '70.

Questo moderno materiale da costruzione, che ha significativamente condizionato l'architettura moderna, è nato come il connubio tra due differenti materiali: l'acciaio ed il conglomerato cementizio, l'elevata alcalinità del quale è l'ambiente ideale per proteggere le barre d'armatura in acciaio.

Se in assenza di specifiche cause di degrado, come ambienti acidi o solfatici, cicli di gelo-disgelo, presenza di aggregati reattivi, il calcestruzzo semplice presenta la durabilità di una pietra naturale, nel caso del calcestruzzo armato l'eventualità di corrosione delle armature può compromettere, a volte anche in modo molto grave, la funzionalità e l'integrità dell'opera. La protezione delle barre d'acciaio è affidata prevalentemente allo strato corticale di calcestruzzo che separa le stesse dall'ambiente esterno, comunemente detto *copriferro*, e in modo particolare dal suo spessore. Solo negli ultimi due decenni si è diffusa la consapevolezza dell'importanza di un corretto

dimensionamento del copriferro e ciò non solo tra gli operatori del settore, ma anche tra i legislatori. Tuttavia non è raro trovare situazioni in cui si sottostima il problema o, ancora peggio, casi in cui l'esistenza dello stesso viene totalmente ignorato; e anche quando viene eseguita una corretta progettazione della miscela di calcestruzzo e dello spessore di copriferro da adottare, spesso in fase di realizzazione i buoni propositi vengono disattesi da una certa, e purtroppo diffusa, superficialità nell'esecuzione. Valga per tutti l'esempio di quanto sia arduo per il direttore dei lavori verificare l'utilizzo dei distanziatori in cantiere e scongiurare che le maestranze poggino, perfino, le armature delle travi in c.a. direttamente sulla cassaforma.

Ne risulta oggi un patrimonio così giovane di strutture in c.a. eppure così deteriorate, soprattutto quelle realizzate a faccia-vista, cioè senza alcuna protezione del paramento esterno, impiegate principalmente per infrastrutture: piloni per viadotti, ponti, strutture marine, ovvero proprio per quelle strutture maggiormente esposte agli attacchi ambientali e proprio per le quali viene richiesta una vita utile più lunga. Non è, quindi, sufficiente progettare una struttura resistente solo ai carichi, statici e dinamici, ma occorre considerare tra gli agenti sollecitanti anche quelli che causano il degrado dell'opera, inteso come il decadimento delle prestazioni attese in un tempo inferiore a quello di progetto (*vita utile attesa*). Tale intento coinvolge inevitabilmente anche altre discipline oltre la scienza e la tecnica delle costruzioni, che riguardano l'analisi e la progettazione strutturale e la chimica applicata ai materiali.

Il presente studio non riguarda propriamente la chimica del calcestruzzo, che pure rappresenta un interessante ed attuale ambito di ricerca, ma affronta piuttosto aspetti tecnologici che riguardano il progetto, la manutenzione ed il recupero di elementi strutturali in c.a.

La trattazione è stata focalizzata ai principali agenti che inducono la corrosione delle barre d'armatura: la presenza di cloruri nel calcestruzzo e la presenza di carbonatazione del calcestruzzo, nonché la loro azione combinata, corrispondenti rispettivamente alle classi ambientali che la normativa indica con le sigle XS e XC. L'obiettivo è quello di proporre un modello che, considerando con approccio probabilistico l'elevato numero di permutazioni associato ai numerosi parametri che regolano i fenomeni indagati, possa essere di pratico impiego per la progettazione o la verifica del copriferro di elementi in c.a. direttamente esposti agli ambienti XS e XC. Il modello proposto può essere impiegato sia dai progettisti, anche non necessariamente esperti dei dettagli degli argomenti trattati, sia dai ricercatori che potranno utilizzare il modello per eseguire test dal vero e calibrare i parametri impiegati; l'approccio proposto può, inoltre, essere esteso agli altri fenomeni di degrado non considerati nel presente studio.

Il presente lavoro è articolato in sei capitoli, comprensivi del primo capitolo di introduzione.

Il secondo capitolo tratta i concetti di degrado e durabilità, dei fenomeni di degrado del c.a. in generale, sia di tipo chimico-fisico che di tipo intrinseco. Viene considerata, poi, l'evoluzione della normativa sull'argomento, italiana ed europea, fino all'attuale definizione delle classi di esposizione ambientale.

Il terzo capitolo tratta nel dettaglio i fenomeni di degrado relativi alle classi XS (*Corrosione delle armature indotta dai cloruri provenienti dall'acqua di mare*) e XC (*Corrosione delle armature indotta da carbonatazione del calcestruzzo*) e ne definisce i modelli deterministi che regolano l'andamento del degrado nel tempo attraverso lo spessore di copriferro in funzione di tutte le altre condizioni al contorno. Viene considerato, inoltre, anche il caso

congiunto di presenza contemporanea di agenti relativi alla classe XS e di agenti relativi alla classe XC sulla stessa struttura.

Il quarto capitolo riprende i modelli presentati nel terzo capitolo e ne propone un approccio probabilistico, quale naturale strumento di analisi per problemi con elevato numero di permutazioni. I numerosi parametri considerati vengono definiti non più da valori ben determinati in funzione delle condizioni al contorno, come per i modelli deterministici, bensì da distribuzioni normali desunte da un numero più o meno elevato di test dal vero. L'elevato numero di test da eseguire e la tipologia di problema affrontato hanno spinto all'impiego del metodo Monte Carlo quale strumento di simulazione dei test per la generazione di numeri pseudocasuali. I risultati ottenuti, trattati con strumenti di analisi statistica, sono stati poi confrontati con quelli ottenuti, per le stesse condizioni, applicando il modello deterministico di partenza. Il confronto tra il modello probabilistico proposto ed il modello deterministico è riportato in grafici.

Nel quinto capitolo viene applicato il modello proposto in varie e significative condizioni, ponendo a confronto i risultati ottenuti al variare di alcuni parametri significativi, mantenendo costanti gli altri. Viene, inoltre, illustrato come il modello proposto può essere impiegato sia per il progetto del copriferro di nuovi elementi in c.a. per una richiesta *Vita Utile di Progetto*, che per la stima della *Vita Utile Residua* di elementi esistenti in c.a..

Nel quinto capitolo vengono anche esaminate le principali tecniche di prevenzione e protezione per le strutture in c.a., con particolare riferimento alle tecniche elettrochimiche. Benché esulino dal presente lavoro si è ritenuto di dare un cenno a queste tematiche per la loro stretta interconnessione con gli argomenti trattati e per la possibilità di impiegare il modello proposto non solo

in fase di progetto, ma soprattutto in fase di verifica per le strutture esistenti, per la relativa programmazione degli interventi di manutenzione.

Nel sesto capitolo, infine, si traggono le conclusioni e si riporta una sintesi dei risultati ottenuti dall'applicazione del modello. Un ultimo paragrafo riguarda le prospettive di sviluppo futuro.

Capitolo 2

Fenomeni di degrado del c.a.

2.1 DEGRADO E DURABILITÀ

Il CEB (*Comitato Intereuropeo del Calcestruzzo*) ha definito la durabilità come l'attitudine di un'opera a sopportare agenti aggressivi di diversa natura mantenendo inalterate le caratteristiche meccaniche e funzionali.

Equivalentemente il degrado di un'opera rappresenta il decadimento delle prestazioni, non solo meccaniche ma anche funzionali, durante il tempo di riferimento. Il concetto di durabilità è direttamente collegato a quello di *vita di servizio attesa* (di progetto) intesa come periodo di tempo durante il quale la struttura è capace di sostenere tutte le azioni attese, rimanendo adatta all'impiego per cui è stata progettata, purchè sia correttamente effettuata la programmata manutenzione. Il primo passo per il progetto di una struttura durevole è, quindi, la definizione di:

- Vita utile di progetto: scelta dal progettista di concerto con il proprietario o gestore dell'opera da realizzare. Se non diversamente indicato si assume pari almeno a 50 anni per opere ordinarie e almeno a 100 anni per opere di grandi dimensioni o di importanza strategica,

come indicato anche al punto 2.4.1. delle Norme Tecniche per le Costruzioni di cui al D.M. 14 gennaio 2008 (Tabella 2.1).

- Condizioni ambientali: da valutare in funzione del sito in cui si troverà la struttura e delle azioni che l'ambiente eserciterà su di essa.

TIPI DI COSTRUZIONE		Vita Nominale V_N (in anni)
1	Opere provvisorie – Opere provvisionali - Strutture in fase costruttiva ¹	≤ 10
2	Opere ordinarie, ponti, opere infrastrutturali e dighe di dimensioni contenute o di importanza normale	≥ 50
3	Grandi opere, ponti, opere infrastrutturali e dighe di grandi dimensioni o di importanza strategica	≥ 100

Tabella 2.1 Vita nominale per diversi tipi di opere riportata al punto 2.4.1 delle NTC.

Fissate le condizioni ambientali e la vita utile di progetto, occorre valutare, mediante opportuni modelli, l'evoluzione nel tempo del degrado sui materiali scelti per la struttura. Nel caso del calcestruzzo si tratta, a questo punto, di progettare il materiale (la miscela) piuttosto che sceglierlo semplicemente: in pratica non esiste un calcestruzzo uguale ad un altro, ma soprattutto non esiste un calcestruzzo valido per tutte le condizioni. Basti pensare all'ampia possibilità di scelta che anche la normativa offre già solo per il tipo di legante (Tabella 2.2).

Tipi di cemento	Denominazione	Sigla	Clinker K	Loppa d'altoforno granulata S	Micro-silice D	Pozzolana		Cenere Volante		Scisto Calcinato T	Calcare Calcare L	Costituenti secondari
						Naturale P	Industriale Q	Silicea V	Calceia W			
I	Cem. Portland	I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
II	Cem. Portland alla loppa	II/A-S II/B-S	80-94 65-79	6-20 21-35	-	-	-	-	-	-	-	0-5 0-5
	Cem. Portland alla microsilice	II/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland alla pozzolana	II/A-P II/B-P II/A-Q II/B-Q	80-94 65-79 80-94 65-79	- - - -	- - - -	6-20 21-35	- - 6-20 21-35	- - - -	- - - -	- - - -	- - - -	0-5 0-5 0-5 0-5
	Cemento Portland alle cenere volanti	II/A-V II/B-V II/A-W II/B-W	80-94 65-79 80-94 65-79	- - - -	- - - -	- - - -	- - - -	6-20 21-35	- - 6-20 21-35	- - - -	- - - -	0-5 0-5 0-5 0-5
	Cem. Port. allo scisto calcinato	II/A-T II/B-T	80-94 65-79	- -	- -	- -	- -	- -	- -	6-20 21-35	- -	0-5 0-5
	Cem. Portland al calcare	II/A-L II/B-L	80-94 65-79	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	6-20 21-35	0-5 0-5
	Cem. Portland composito	II/A-M II/B-M	80-94 65-79	<div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></</div></div>								

Tabella 2.2 Tipi di cemento previsti dalla norma UNI ENV 197/1

Il progetto della miscela (*Mix Design*) dovrà garantire che, con ragionevole probabilità, il degrado dei materiali durante la vita di servizio richiesta sia tale da non compromettere la stabilità e la funzionalità dell'opera.

Per il raggiungimento dell'obiettivo risultano fondamentali:

- le prescrizioni che il progettista dovrà fornire per le modalità esecutive al fine di attuare le proprie scelte progettuali;
- la corretta manutenzione dell'opera effettuata secondo un'opportuna programmazione degli interventi.

2.2 PROCESSI DI DEGRADO PER IL CALCESTRUZZO

Il degrado del calcestruzzo può manifestarsi già nei primi giorni dopo la sua posa in opera, o addirittura nelle prime ore, con il manifestarsi di fessure in genere dovute ad assestamento plastico, ritiro contrastato, creep, calore di idratazione. Sebbene questi processi, imputabili comunque ad errori progettuali o costruttivi, favoriscano la penetrazione degli agenti aggressivi rendendo la struttura più vulnerabile, essi vengono considerati tra i processi di *degrado precoce* per distinguerli da quelli, con tempi d'azione più lunghi, ascrivibili alle condizioni ambientali. Questi ultimi vengono spesso distinti in processi di tipo *fisico* (variazioni termiche, incendi, cicli di gelo-disgelo) *chimico* (attacco acido, solfatico, da solfuri, reazioni alcalo-aggregati) *biologico* (fouling) *meccanico* (abrasione, erosione, urto, esplosione) *strutturale* (sovraccarichi, assestamenti, cicli di carico-scarico) ma la distinzione è solo schematica poiché spesso sono presenti contemporaneamente o si influenzano vicendevolmente.

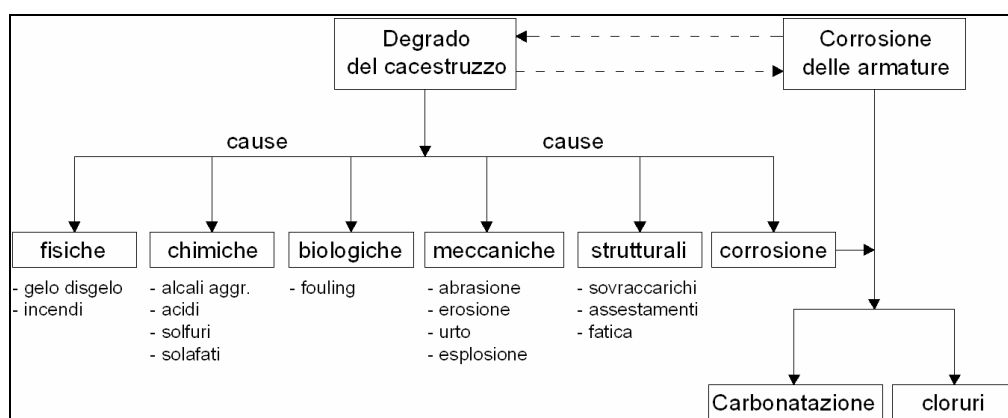


Figura 2.1 Schema delle cause di degrado per le opere in c.a. [1]

Per il cemento armato la causa più frequente di degrado è data dalla corrosione delle armature, la quale risulta strettamente legata ai processi di degrado del calcestruzzo: questi ultimi, infatti, provocano fessurazioni nello strato di calcestruzzo che ricopre le armature (il copriferro) riducendo le sue caratteristiche protettive; d'altra parte l'azione espansiva legata alla corrosione delle armature provoca fessurazioni e distacchi del calcestruzzo in corrispondenza proprio del copriferro. Da questo punto di vista, dunque, il degrado del sistema bicomponente c.a. è sostanzialmente regolato dalla velocità dei processi corrosivi delle barre d'armature e dalla velocità di penetrazione degli agenti corrosivi attraverso lo spessore di copriferro. La corrosione delle armature può essere indotta dalla *carbonatazione del calcestruzzo* o dalla *penetrazione dei cloruri*, escludendo il caso piuttosto raro delle correnti disperse. Per questo motivo il presente lavoro riguarda i due aspetti citati con riferimento allo spessore di calcestruzzo che costituisce il copriferro.

2.3 LE CLASSI DI ESPOSIZIONE AMBIENTALE

La storia normativa in materia di degrado è piuttosto recente: le prime indicazioni risalgono agli anni '90 con la norma UNI 9858 – ENV 206, sostituita dalle UNI EN 206-1:2006 e UNI 11104:2004; gran parte dei contenuti di tali norme sono state recepite in Italia dalle *Linee guida sul calcestruzzo strutturale* del Ministero dei Lavori Pubblici.

La normativa cogente considera il problema del degrado già con il D.M. LL.PP. del 9/1/1996 *Norme tecniche per il calcolo, l'esecuzione ed il collaudo delle opere in cemento armato normale e precompresso e per le strutture metalliche*, che al punto 2.1.8 recita: *Al fine di garantire la durabilità del conglomerato*

particolarmente in ambiente aggressivo, così come in presenza di cicli di gelo e disgelo, è necessario studiarne adeguatamente la composizione

Si tratta di un primo timido passo: sebbene il problema della durabilità venga posto all'attenzione del progettista, la norma lo circoscrive agli ambienti aggressivi, o al caso dei cicli di gelo e disgelo, raccomandando di studiare la composizione del conglomerato, ma senza fornire limiti o prescrizione alla progettazione e all'esecuzione.

A distanza di poco più di un decennio l'Italia si è dotata di un testo unico per la progettazione strutturale con le Norme Tecniche per le Costruzioni di cui al D.M. 14/1/2008, attuale normativa vigente per il settore, che tratta della durabilità al punto 11.2.11, il quale recita: *Per garantire la durabilità delle strutture in calcestruzzo armato ordinario o precompresso, esposte all'azione dell'ambiente, si devono adottare i provvedimenti atti a limitare gli effetti di degrado indotti dall'attacco chimico, fisico e derivante dalla corrosione delle armature e dai cili di gelo e disgelo.*

A tal fine in fase di progetto la prescrizione, valutate opportunamente le condizioni ambientali del sito ove sorgerà la costruzione o quelle di impiego, deve fissare le caratteristiche del calcestruzzo da impiegare, i valori del copriferro e le regole di manutenzione.

Al fine di ottenere la prestazione richiesta in funzione delle condizioni ambientali,...si potrà fare utile riferimento...alle norme UNI EN 206-1:2006 e UNI 11104:2004.

Il decennio che separa la stesura dei due testi normativi appena riportati è caratterizzato da una maggiore sensibilità degli operatori del settore nei confronti di temi prima del tutto sottovalutati, come la programmazione della manutenzione, e rappresenta anche il periodo di tempo in cui sono state

sviluppate le più recenti ricerche in materia di degrado del calcestruzzo, che resta comunque una disciplina piuttosto giovane. Basti pensare che molte di queste ricerche sono tuttora in corso, a causa dei lunghi tempi d'osservazione per lo svolgimento dei test al vero.

E' sufficiente osservare, inoltre, come l'odierna normativa faccia esplicito riferimento ai diversi tipi di attacco, nonché alla corrosione delle armature, rinviando alle norme UNI già descritte.

Restano fino ad ora ancora aperti i problemi legati alla corretta modellazione di tali attacchi e, soprattutto, il problema della corretta definizione dei parametri che intervengono, già numerosi anche nei modelli più semplici. L'attuale norma, evitando di ricorrere a concetti troppo specifici, fissa alcune prescrizioni sui dosaggi, sul rapporto acqua/cemento, sul copriferro quasi tradendo in questo modo il carattere prestazionale che il legislatore ha voluto preferire a quello prescrittivistico delle precedenti norme.

In tale ottica il presente lavoro vuole fornire un contributo alla modellazione dei fenomeni di degrado più significativi (carbonatazione e penetrazione dei cloruri nel calcestruzzo) fornendo uno strumento di pratica e semplice applicazione. Il modello proposto si rivolge così ai tecnici che operano nel settore della progettazione delle strutture in c.a., ma anche a ricercatori o quanti studiano il degrado del c.a. potendo intervenire sui parametri considerati o applicando l'approccio per la modellazione delle altre forme di attacco.

Nel passaggio dalle prime norme UNI alle attuali richiamate dalle NTC del 2008 le classi di esposizione sono passate dalle precedenti 9 alle attuali 6, che però comprendono altre sottoclassi per un totale di 18 scenari possibili, distinti

con le sigle XO, XC, XD, XS, XA e XF seguite da numeri per indicare le sottoclassi.

La Tabella 2.3 riporta le classi ambientali previste con le relative sottoclassi, il confronto con la classificazione della precedente norma, le prescrizioni dell'attuale norma.

Denom. della classe	Descrizione dell'ambiente	Esempi informativi di situazioni a cui possono applicarsi le classi di esposizione	UNI 9858	A/C MAX	R'ck min.	Dos. Min. Cem. KG.
1 Assenza di rischio di corrosione o attacco						
X0	Per calcestruzzo privo di armatura o inserti metallici: tutte le esposizioni eccetto dove c'è gelo e disgelo o attacco chimico. Calcestruzzi con armatura o inserti metallici: in ambiente molto asciutto	Interno di edifici con umidità relativa molto bassa. Calcestruzzo non armato all'interno di edifici. Calcestruzzo non armato immerso in suolo non aggressivo o in acqua non aggressiva. Calcestruzzo non armato soggetto ad cicli di bagnato asciutto ma non soggetto ad abrasioni, gelo o attacco chimico	1	---	15	---
2 Corrosione indotta da carbonatazione Nota – Le condizioni di umidità si riferiscono a quelle presenti nel copriferro e nel ricoprimento di inserti metallici, ma in molti casi si può considerare che tali condizioni riflettano quelle dell'ambiente circostante, in questi la classificazione dell'ambiente circostante può essere adeguata. Questo può non essere il caso se c'è una barriera fra il calcestruzzo ed il suo ambiente.						
XC1	Asciutto o permanentemente bagnato	Interni di edifici con umidità relativa bassa. Calcestruzzo armato ordinario o precompresso con le superfici all'interno di strutture con eccezione delle parti esposte a condensa o immerse in acqua	2a	0,60	30	300
XC2	Bagnato, raramente asciutto	Parti di strutture di contenimento liquidi, fondazioni. Calcestruzzo armato ordinario o precompresso prevalentemente immerso in acqua o terreno non aggressivo.	2a	0,60	30	300
XC3	Umidità moderata	Calcestruzzo armato ordinario o precompresso in esterni con superfici esterne riparate dalla pioggia o in interni con umidità da moderata ad alta	5a	0,55	35	320
XC4	Ciclicamente asciutto e bagnato	Calcestruzzo armato ordinario o precompresso in esterni con superfici soggette ad alternanze di asciutto ed umido. Calcestruzzi a vista in ambienti urbani.	4a, 5b	0,50	40	340
3 Corrosione indotta da cloruri esclusi quelli provenienti dall'acqua di mare						
XD1	Umidità moderata	Calcestruzzo armato ordinario o precompresso in superfici o parti di ponti e viadotti esposti a spruzzi d'acqua contenenti cloruri	5a	0,55	35	320
XD2	Bagnato, raramente asciutto	Calcestruzzo armato ordinario o precompresso in elementi strutturali totalmente immersi in acqua industriali contenente cloruri (piscine)	4a, 5b	0,50	40	340
XD3	Ciclicamente asciutto e bagnato	Calcestruzzo armato ordinario o precompresso, di elementi strutturali direttamente soggetti agli agenti disgelanti o agli spruzzi contenenti agenti disgelanti. Calcestruzzo armato o precompresso, elementi con una superficie immersa in acqua contenente cloruri e l'altra esposta all'aria. Parti di ponti, pavimentazioni e parcheggi per auto.	5c	0,45	45	360
4 Corrosione indotta da cloruri presenti nell'acqua di mare						
XS1	Esposto alla salsedine marina ma non direttamente in contatto con l'acqua	Calcestruzzo armato ordinario o precompresso con elementi strutturali sulle coste o in prossimità	4a, 5b	0,50	40	340
XS2	Permanentemente sommerso	Calcestruzzo armato ordinario o precompresso di strutture marine completamente immersa in acqua	5c	0,45	45	360
XS3	Zone esposte agli spruzzi oppure alla marea	Calcestruzzo armato ordinario o precompresso con elementi strutturali esposti alla battigia o alle zone soggette agli spruzzi ed onde del mare	5c	0,45	45	360
5 Attacco dei cicli gelo/disgelo con o senza disgelanti *(NB XF2 – XF3 – XF4 contenuto minimo aria 3%)						
XF1	Moderata saturazione d'acqua, in assenza di agente disgelante	Superfici verticali di calcestruzzo come facciate o colonne esposte alla pioggia ed al gelo. Superfici non verticali e non soggette alla completa saturazione ma esposte al gelo, alla pioggia o all'acqua	4a, 5b	0,50	40	320
XF2*	Moderata saturazione d'acqua in presenza di agente disgelante	Elementi come parti di ponti che in altro modo sarebbero classificati come XF1 ma che sono esposti direttamente o indirettamente agli agenti disgelanti	3, 4b	0,50	30	340
XF3*	Elevata saturazione d'acqua in assenza di agente disgelante	Superfici orizzontali in edifici dove l'acqua può accumularsi e che possono essere soggetti ai fenomeni di gelo, elementi soggetti a frequenti bagnature ed esposti al gelo	2b, 4b	0,50	30	340
XF4*	Elevata saturazione d'acqua con presenza di agente antigelo oppure acqua di mare	Superfici orizzontali quali strade o pavimentazioni esposte al gelo ed ai sali disgelanti in modo diretto od indiretto, elementi esposti al gelo e soggetti a frequenti bagnature in presenza di agenti disgelanti o di acqua di mare	3, 4b	0,45	35	360
6 Attacco chimico **)						
XA1	Ambiente chimicamente debolmente aggressivo secondo il prospetto 2 della UNI EN 206-1	Contentori di fanghi e vasche di decantazione. Contentori e vasche per acqua reflue	5a	0,55	35	320
XA2	Ambiente chimicamente moderatamente aggressivo secondo il prospetto 2 della UNI EN 206-1	Elementi strutturali o pareti a contatto di terreni aggressivi	5b	0,50	40	340
XA3	Ambiente chimicamente fortemente aggressivo secondo il prospetto 2 della UNI EN 206-1	Elementi strutturali o pareti a contatto di acqua industriali fortemente aggressive. Contentori di foraggi, mangimi e liquami provenienti dall'allevamento animale. Torri di raffreddamento di fumi e gas di scarico industriali.	5c	0,45	45	360

Tabella 2.3 Le classi di esposizione ambientale

Capitolo 3

Modelli deterministici

3.1 CORROSIONE INDOTTA DA CLORURI PRESENTI NELL'ACQUA DI MARE - AMBIENTI XS

Il degrado del calcestruzzo armato causato dalla presenza di cloruri viene individuato dalle classi di esposizione XS e XD in base alla provenienza degli ioni: rispettivamente dall'acqua di mare oppure da altri tipi di soluzioni (in genere con sali disgelati).

I cloruri provenienti da acqua di mare, che sono quelli trattati nel presente studio, molto spesso sono accompagnati da altri processi di degrado, causati più in generale dall'acqua di mare: erosione superficiale provocate da onde e maree, rigonfiamento causato dalla cristallizzazione dei Sali, attacco chimico dei solfati disciolti. Si distingue, nell'ambito della classe XS, la casistica relativa alle tre condizioni contraddistinte dalle sigle XS1: calcestruzzo esposto alla salsedine marina ma non direttamente in contatto con l'acqua, XS2: calcestruzzo permanentemente sommerso e XS3: zone esposte alle maree o agli spruzzi. Quest'ultima sottoclasse contempla il caso di maggior criticità in quanto l'acqua tende a risalire per capillarità nel calcestruzzo

appena sopra il livello del mare; successivamente l'acqua evapora rilasciando i sali che, cristallizzando nei pori, provocano degli sforzi interni che possono fessurare il calcestruzzo. Il movimento delle onde o delle maree accelerano il processo asportando il calcestruzzo fessurato. Anche il caso della sottoclasse XS1 non è da sottovalutare in quanto l'azione del vento trasporta e deposita la salsedine sulla superficie del calcestruzzo di elementi più o meno prossimi alla costa; la maggiore concentrazione superficiale accelera i processi di diffusione dei cloruri attraverso lo strato corticale di calcestruzzo.

In ogni caso la presenza di cloruri può indurre la corrosione per pitting sulle armature. In un calcestruzzo non carbonatato la condizione limite si ritiene raggiunta allorquando in corrispondenza della superficie delle barre di armature la concentrazione di cloruri supera il valore di soglia sufficiente a rompere il film di passività dell'armatura (*tenore critico di cloruri*).

Il rischio di corrosione da cloruri dipende quindi dalla velocità di penetrazione dei cloruri attraverso il copriferro, regolata da una cinetica piuttosto complessa che dipende, tra l'altro, da numerosi fattori.

Le leggi fondamentali della diffusione sono la prima (3.1) e la seconda (3.2) legge di Fick, valide rispettivamente in regime di flusso stazionario ed in regime di flusso non stazionario, entrambe considerate per flusso unidirezionale:

$$F = -D \frac{dC}{dx} \quad (3.1)$$

dove F rappresenta il flusso, D il coefficiente di diffusione, x la direzione del flusso e $C = C(x)$ la concentrazione della specie che diffonde.

Nel caso della seconda legge di Fick la concentrazione è funzione anche del tempo t ed il flusso è regolato dalla relazione:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (3.2)$$

L'equazione differenziale (3.2) viene integrata assumendo le seguenti condizioni al contorno:

- La concentrazione sulla superficie del calcestruzzo resta costante nel tempo e pari a C_s (ovvero $C=C_s$ per $x=0$ e per ogni t).
- Il coefficiente di diffusione D non dipende dalle variabili x e t (ovvero il materiale è omogeneo ed il coefficiente di diffusione resta costante durante il processo di penetrazione).
- Assenza di cloruri all'istante iniziale all'interno del calcestruzzo (ovvero $C=0$ per $x>0$ e $t=0$).

La soluzione che si ottiene è la funzione $C=C(x,t)$:

$$\begin{aligned} \frac{C(x,t)}{C_s} &= 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}}\right) \\ C(x,t) &= C_s \cdot \left[1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}}\right) \right] \end{aligned} \quad (3.3)$$

che fornisce la concentrazione di cloruri presenti nel calcestruzzo alla profondità x e al tempo t .

E dove

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-t^2} dt$$

rappresenta la funzione errore, mentre:

$D = [m^2/s]$ Coefficiente di diffusione;

$C_s = [Kg/m^3]$ Concentrazione superficiale di cloruri.

La relazione (3.3) rappresenta il **profilo dei cloruri nel tempo** e permette di costruire le curve di eguale concentrazione di cloruri in un fissato stato evolutivo della penetrazione. In figura 3.1 è riportato un esempio per una struttura in calcestruzzo posta in corrispondenza del bagnasciuga.

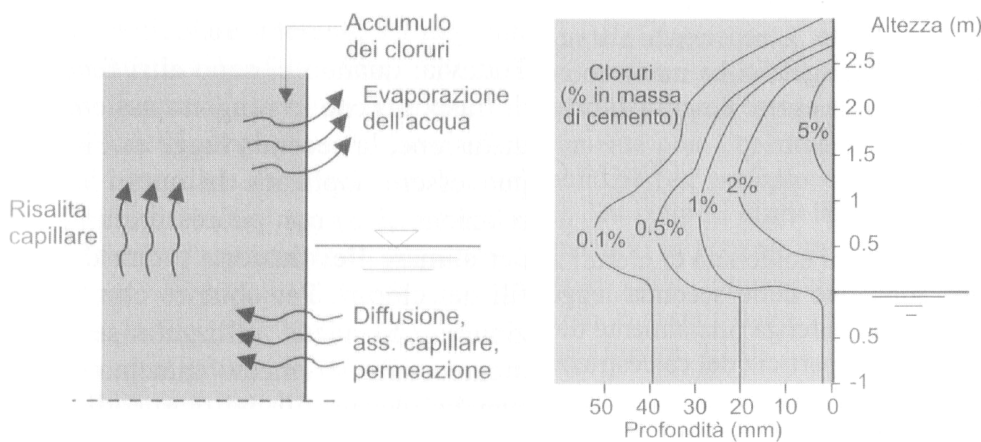


Figura 3.1 Profilo dei cloruri in corrispondenza del bagnasciuga [2]

L'inizio della corrosione delle barre di armatura si ha quando il valore della concentrazione $C(x,t)$ raggiunge il tenore critico C_{CR} in corrispondenza della superficie più esterna della barra, ovvero per $x = x_c$ (dove x_c è lo spessore del copriferro) condizione per la quale l'intero spessore di copriferro presenta una concentrazione di cloruri pari o superiore a quella critica.

Posto allora $C(x,t) = C_{CR}$ per $x = x_c$ e indipendentemente dal tempo t , dalla (3.3) si ricava:

$$C_{CR} = C_S \cdot \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x_c}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) \right] \quad (3.4)$$

nell'unica variabile tempo t .

Dalla relazione (3.4) si ricava:

$$\frac{C_{CR}}{C_S} = \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x_c}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) \right]$$

$$1 - \frac{C_{CR}}{C_S} = \operatorname{erf} \left(\frac{x_c}{2\sqrt{D \cdot t}} \right)$$

$$\left(\frac{x_c}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) = \operatorname{erf}^{-1} \left(1 - \frac{C_{CR}}{C_S} \right)$$

Poiché la funzione inversa della funzione errore non è di facile formulazione, si può considerare per essa lo sviluppo in serie di *Maclaurin* che permette, considerata l'applicazione in esame, di commettere errori del tutto trascurabili. Si considera quindi:

$$\operatorname{erf}^{-1}(z) = \sqrt{\pi} \left(\frac{1}{2} z + \frac{\pi}{24} z^3 + \frac{7}{960} \pi^2 z^5 + \frac{127}{80640} \pi^3 z^7 + \dots \right)$$

[sviluppo in serie di Maclaurin per la funzione erf^{-1}]

Esplicitando x_c , che rappresenta lo spessore di copriferro considerato, si ha:

$$x_c(t) = 2\sqrt{D \cdot t} \cdot \operatorname{erf}^{-1}\left(1 - \frac{C_{CR}}{C_s}\right) \quad (3.5)$$

La relazione (3.5) fornisce la profondità alla quale la concentrazione dei cloruri ha raggiunto il tenore critico dopo che sia trascorso un tempo t . Il valore di x_c , quindi, rappresenta il valore minimo del copriferro da impiegare, per determinati C_{CR} , C_s e D , affinché la concentrazione dei cloruri in corrispondenza delle barre d'armatura superi quella critica solo dopo il tempo t .

Eliminando l'ipotesi semplificativa iniziale, il coefficiente di diffusione D non risulta costante nel tempo, ma varia con la legge (Takewaka 1988):

$$D = D_0 \left(\frac{t_0}{t} \right)^\alpha \quad (3.6)$$

dove

$t_0=28$ giorni;

D_0 rappresenta il valore del coefficiente di diffusione al tempo t_0 ;

α è un parametro che dipende dal rapporto a/c e dal tipo di cemento.

Il coefficiente di diffusione varia anche in funzione della temperatura $T[K]$ secondo la legge di Arrhenius:

$$D(T) = D_0 \cdot \frac{T}{294} \cdot \exp\left[-\frac{E_A}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{294}\right)\right] \quad (3.7)$$

dove

D_0 è il valore assunto da D alla temperatura di 21°C e dopo 28 giorni;

R è la costante dei gas [$J/Kmol$];

E_A è l'energia di attivazione (funzione del rapporto a/c) [J/mol].

Tenendo conto della (3.6) e della (3.7) la (3.5) diventa:

$$x_c(t) = 2\operatorname{erf}^{-1}\left(1 - \frac{C_{CR}}{C_s}\right) \cdot \sqrt{D_0 \cdot \frac{T}{294} \cdot \exp\left[-\frac{E_A}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{294}\right)\right] \cdot \left(\frac{t_0}{t}\right)^\alpha \cdot t} \quad (3.8)$$

L'espressione (3.8) rappresenta la funzione **profilo di penetrazione dei cloruri nel tempo** e può essere impiegata per il progetto del copriferro da adottare per una determinata struttura e per determinate condizioni ambientali ed al contorno, affinché sia garantita la vita utile richiesta (t).

3.1.1 Misura del coefficiente di diffusione dei cloruri

I parametri che intervengono nella relazione (3.8) risultano di difficile caratterizzazione e dipendono essi stessi da numerosi fattori, in particolare per quanto riguarda il coefficiente di diffusione D_0 . Attualmente non si dispone di una procedura sperimentale, che sia riconosciuta a livello internazionale, per la determinazione dell'esatta cinetica di penetrazione dei cloruri nel

calcestruzzo, anche perchè la maggior parte degli studi in tal senso sono stati avviati solo di recente.

Il problema principale nell'esecuzione dei test sperimentali per la determinazione di D_0 risiede nel fatto che solo i test eseguiti con i reali tempi del degrado indagato possono fornire le misure reali dei parametri, ma si tratterebbe di sperimentazioni che durerebbero decenni. E in effetti gli unici valori attendibili presenti in letteratura scientifica sono proprio quelli desunti dalle campagne di sperimentazione iniziate negli anni '90 e terminate nei primi anni del 2000.

Nel presente paragrafo vengono esaminati, invece, i principali metodi accelerati proposti da vari autori che, però, forniscono risultati diversi a parità di condizioni al contorno. Tali prove, quindi, sono più utili per confrontare le prestazioni di diversi calcestruzzi, piuttosto che per ottenere misure dei parametri in senso assoluto.

Le prove vengono distinte in prove di diffusione pura, di migrazione e di misura della resistività.

Nelle prove di diffusione pura si realizza un prefissato gradiente di concentrazione che induce un trasporto di cloruri. Mediante la prova di diffusione in cella (Figura 3.2 a) si instaura un flusso di cloruri costante per cui le concentrazioni variano linearmente nel tempo. Impiegando la prima legge di Fick si può ricavare il valore del coefficiente di diffusione in condizioni stazionarie. Le prove per immersione o di ponding (Figura 3.2 b,c), invece, permettono di ottenere il valore del coefficiente di diffusione in regime non stazionario, nonché il valore della concentrazione superficiale C_s . Partendo da concentrazioni note, e dopo prefissati tempi di diffusione, si

determinano i profili di concentrazione dei cloruri presenti nel provino di calcestruzzo interpolando con la relazione (3.3).

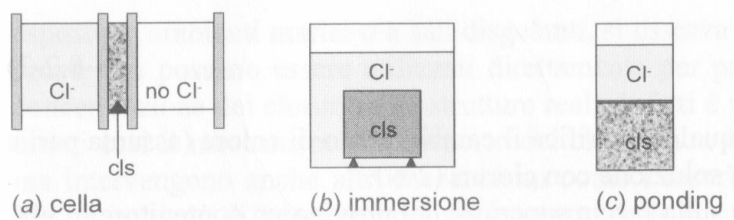


Figura 3.2 Prove di diffusione pura per la misura del coefficiente di diffusione [2]

Nelle prove di migrazione il passaggio dei cloruri viene accelerato applicando un campo elettrico. Tra queste la più famosa è quella che usa una cella inclinata (Figura 3.3 f): nella parte sommatale del provino di calcestruzzo viene montato un recipiente in plastica che ospita la soluzione priva di cloruri.

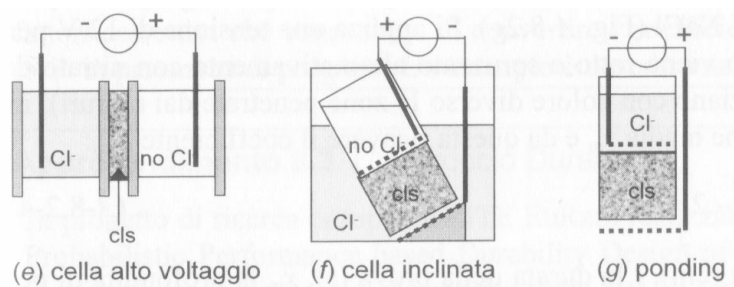


Figura 3.3 Prove di migrazione per la misura del coefficiente di diffusione [2]

Il provino così preparato viene poi immerso, in posizione inclinata, in un recipiente contenente una soluzione al 10% in massa di NaCl. Si applica, quindi, una differenza di potenziali tra gli elettrodi posti nelle due soluzioni pari a 30 V e si stabiliscono da tabella intensità e tensione della corrente,

nonché durata della prova. La prova viene conclusa con la rottura del provino per misurare la profondità media di penetrazione dei cloruri (x_m) spruzzando una soluzione di AgNO_3 sulla superficie di frattura.

Il valore del coefficiente di diffusione (in regime non stazionario) è dato da:

$$D = \frac{RT}{zFE} \cdot \frac{x_m - \alpha \sqrt{x_m}}{t}$$

dove

R è la costante dei gas [J/Kmol];

T è la temperatura media [K];

z è il valore assoluto della valenza;

$E = (U-2)/L$ (U è la tensione applicata, L è lo spessore del provino);

$F = 96500$ è la costante di Faraday [C/mol];

α è un parametro che dipende dalle concentrazioni.

Le prove di misura della resistività sono meno impiegate e prevedono l'impiego di un conduttimetro (Figura 3.3) collegato a due elettrodi posti sulle facce del provino saturo. Nota l'area delle piastre di contatto (A) l'altezza del provino (L) e la conduttanza (C) si calcola la resistività con la relazione:

$$\rho = \frac{A}{CL}$$

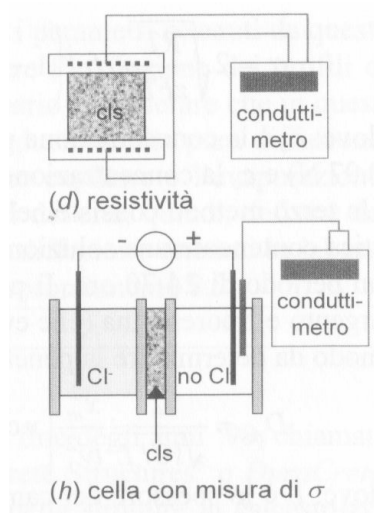


Figura 3.4 Prove di misura della resistività [2]

Come detto le diverse prove appena descritte forniscono valori per i coefficienti a volte anche molto differenti tra loro, tanto da limitarne l'impiego solo per confrontare diversi tipi di calcestruzzi a parità di metodologia di indagine impiegata. Inoltre i valori ottenuti si discostano anche dalle misure riportate in letteratura (purtroppo ancora troppo poche) eseguite su strutture reali esposte in ambienti marini. Pertanto non è possibile l'utilizzo delle prove accelerate per la modellazione di leggi previsionali finalizzate a conoscere l'evoluzione dei profili di concentrazione nelle strutture reali, a meno di definire degli ulteriori parametri correttivi.

3.2 CORROSIONE INDOTTA DA CARBONATAZIONE-AMBIENTI XC

La classe ambientale che contempla i rischi di corrosione indotta da carbonatazione è la XC, la quale comprende 4 sottoclassi, che in ordine di rischio crescente sono:

XC1, Ambiente asciutto o permanentemente bagnato.

XC2, Ambiente bagnato, raramente asciutto.

XC3, Ambiente con umidità moderata.

XC4, Superfici esposte a cicli di bagnato-asciutto.

In condizioni ordinarie il calcestruzzo si comporta come una soluzione alcalina che presenta un pH maggiore di 11,5. In queste condizioni sulla frontiera di contatto tra le superfici delle barre d'armatura ed il calcestruzzo che le ricopre si crea un film di ossido, con uno spessore di appena pochi strati molecolari (*armatura passiva*). L'anidride carbonica proveniente dall'ambiente esterno attraversa la matrice del calcestruzzo attraverso i suoi pori e neutralizza l'alcalinità presente secondo un insieme di reazioni che coinvolge non solo l'idrossido di calcio (portlandite) ma anche l'idrossido di sodio e di potassio oltre ai silicati di calcio idrato.

Schematicamente l'insieme delle reazioni di carbonatazione può scriversi come:



In questa fase, che viene chiamata di *innesco*, il pH del calcestruzzo si riduce sensibilmente, fino alla neutralità. Questo aspetto in realtà non produce nessun effetto dannoso per il calcestruzzo, anzi in alcuni casi ne migliora la

resistenza meccanica. Tuttavia la perdita di alcalinità non assicura più la presenza del film passivante sulle superfici delle barre d'armatura, le quali risultano ora esposte al rischio di corrosione, che può attivarsi per la presenza di acqua e ossigeno secondo la reazione:

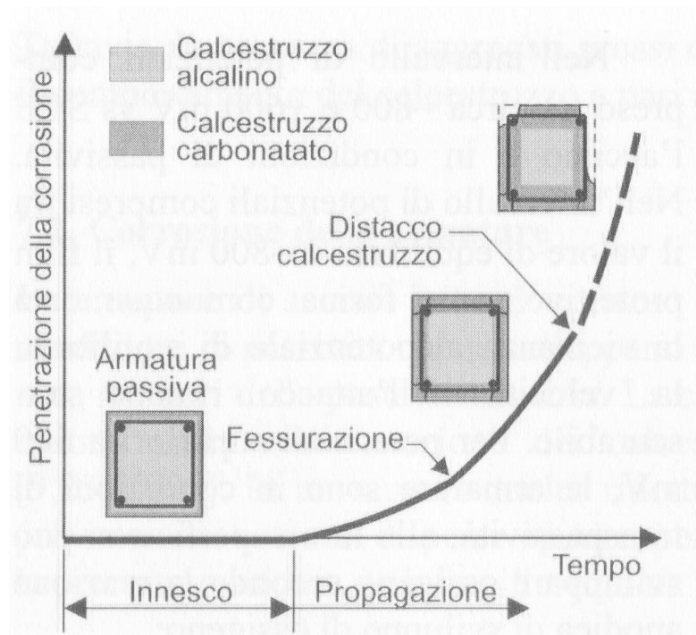
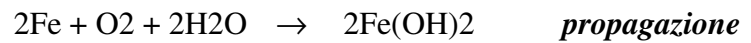


Figura 3.5 Andamento della penetrazione della corrosione indotta da carbonatazione [2]

A differenza della misura del coefficiente di diffusione dei cloruri, la misura del fronte carbonatato per un calcestruzzo è piuttosto semplice e soprattutto riconosciuta a livello internazionale (UNI 9944). E' sufficiente spruzzare sulla superficie di rottura del provino (la misura deve essere fatta

subito dopo la rottura) una soluzione alcoolica di fenolftaleina e osservare la diversa colorazione della superficie. Anche la legge di penetrazione della carbonatazione è piuttosto semplice ed è del tipo:

$$x = K \cdot t^{\frac{1}{n}} \quad (3.9)$$

in genere, per calcestruzzi porosi, si pone $n=2$ e la (3.9) diventa:

$$x = K \cdot \sqrt{t} \quad (3.10)$$

dove $K [mm/anno^{1/2}]$ dipende dal rapporto acqua/cemento, dal tipo di cemento, dall'umidità (Figura 3.6).

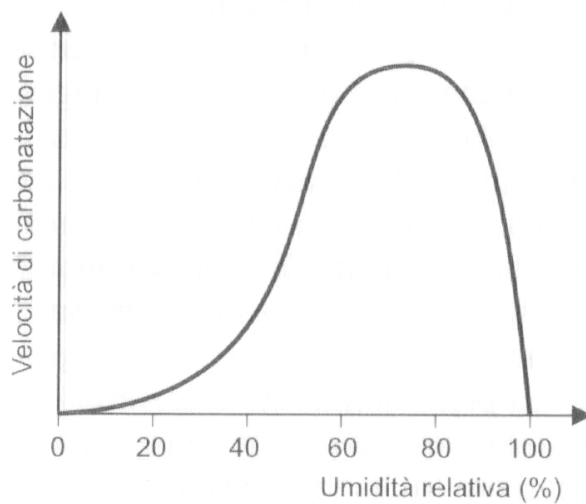


Figura 3.6 Andamento della velocità di carbonatazione in funzione dell'umidità

Più recentemente, soprattutto per il largo diffondersi di diversi tipi di cemento, altri autori hanno proposto diverse leggi di propagazione del fronte carbonatato nel calcestruzzo. Si riportano di seguito i principali.

Modello di Tutti (1983):

$$\frac{C_s}{C_x} = \sqrt{\pi} \left[\frac{x/\sqrt{t}}{2\sqrt{D}} \right] \exp \left[\frac{x^2/\sqrt{t}}{2\sqrt{D}} \right] \operatorname{erf} \left[\frac{x/\sqrt{t}}{2\sqrt{D}} \right]$$

Modello di Bakker (1988):

$$x_n = \sqrt{\frac{2D_c}{a}} (C_1 - C_2) \left[t_{d1} + t_{d2} \cdot \left(\frac{x_1}{B} \right)^2 + \dots + t_{dn} \cdot \left(\frac{x_{n-1}}{B} \right)^2 \right]$$

Modello di Parrott (1994):

$$x = 64 \frac{K^{0,4} t^n}{c^{0,5}}$$

Nel presente lavoro è stato considerato il modello proposto dall'*International Federation for Structural Concrete (fib)*, riportato al *Bullettin n.34 (2006)* :

$$x_c = \sqrt{2 \cdot k_e \cdot k_c \cdot (k_t \cdot R_{acc}^{-1} + \varepsilon_t)} \cdot C_s \cdot \sqrt{t} \cdot W$$

dove

k_e : coefficiente ambientale;

k_c : coefficiente di esecuzione;

k_t : coefficiente di regressione;

R_{acc} : resistenza alla carbonatazione $[(Kg/m^3)/(mm^2/anno)]$

C_s : concentrazione superficiale di CO_2 [Kg/m^3]

W : fattore climatico

Mentre per i calcestruzzi esposti alla penetrazione dei cloruri la vita utile di servizio viene considerata pari al tempo necessario affinché la concentrazione dei cloruri diventi pari a quella critica in prossimità della superficie esterna delle barre d'armatura, nel caso dei calcestruzzi esposti a carbonatazione la vita utile di servizio viene considerata pari alla somma del tempo di propagazione del fronte carbonatato nel copriferro (*innesco*) e del tempo necessario a raggiungere la penetrazione massima accettabile per l'armatura (*propagazione*).

l'avanzamento della corrosione della barra d'armatura nel tempo (propagazione) avviene secondo la legge:

$$v_{corr} = \frac{P}{t} \quad (3.11)$$

dove P è la penetrazione della corrosione.

Per cui, posto un valore limite per la penetrazione della corrosione dell'armatura ed esplicitando il relativo tempo in virtù della (3.11), la relazione (3.10) diventa:

$$x_c(t) = K \cdot \sqrt{t - \frac{P_{lim}}{v_{corr}}} \quad (3.12)$$

dove K è quello proposto dal modello *fib* del 2006:

$$K = \sqrt{2 \cdot k_e \cdot k_c \cdot (k_t \cdot R_{acc}^{-1} + \varepsilon_t) \cdot C_s \cdot W}$$

con il significato già esposto dei coefficienti.

La relazione (3.12) consente di stimare, con legge parabolica, lo spessore di copriferro necessario a scongiurare il superamento di P_{lim} dopo un certo numero di anni t , avendo considerato sia la fase di innesco che di propagazione della corrosione indotta dalla carbonatazione.

Equivalentemente si può stimare la vita residua al tempo t_0 per una struttura esistente dotata di un copriferro pari a x_c :

$$t_r = t_i + t_p - t_0 = \left(\frac{x_c}{K} \right)^2 + \frac{P_{lim}}{v_{corr}} - t_0$$

dove

t_r è la vita utile residua;

t_i è il tempo di innesco;

t_p è il tempo di propagazione;

$t_0 + t_r$ rappresenta la vita utile di servizio.

Si pone, inoltre, l'attenzione che anche la tipologia di corrosione è diversa tra ambienti XS e XC: mentre la corrosione da cloruri è di tipo localizzato e colpisce solo alcune zone dell'armatura, circondate da zone non corrose (*pitting*), la corrosione da carbonatazione risulta omogeneamente distribuita sull'intera superficie dell'armatura.

3.3 CORROSIONE INDOTTA DA EFFETTI COMBINATI

Nei casi reali e per particolari strutture è possibile che siano presenti contemporaneamente sia i rischi previsti per le classi ambientali XS che quelli previsti per le classi ambientali XC, come nel caso di strutture, o parti di strutture, realizzare in c.a. a vista, senza alcun rivestimento protettivo, in prossimità della costa e in ambiente cittadino (con tenori di CO₂ in atmosfera prossimi allo 0,2%). Si pensi a infrastrutture stradali realizzate in prossimità del mare o a strutture marittime realizzare in città densamente trafficate.

In tali casi non è possibile, nel caso ad esempio di dimensionamento del copriferro, sommare i valori ottenuti applicando separatamente le leggi descritte ai due paragrafi precedenti e neanche considerare il massimo dei due valori calcolati, in quanto si rischierebbe di sottostimare il problema. Ciò è conseguenza degli aspetti “collaterali” legati ai singoli processi descritti ai paragrafi precedenti e che vengono di seguito esaminati.

Già durante la fase di innesco del processo di carbonatazione vengono dissociati dei cloroalluminati presenti tra i prodotti di idratazione, con conseguente liberazione di cloruri nella soluzione dei pori [3]. Occorre, in tal caso, rimuovere l’ipotesi semplificativa posta tra le condizioni al contorno per l’integrazione della seconda legge di Fick (3.2) secondo la quale la concentrazione iniziale di cloruri sia nulla.

Ponendo, invece, $C=C_i$ per $x>0$ e $t=0$, la (3.8) diventa:

$$x_c(t) = 2 \operatorname{erf}^{-1} \left(1 - \frac{C_{CR} - C_i}{C_s - C_i} \right) \cdot \sqrt{D_0 \cdot \frac{T}{294} \cdot \exp \left[-\frac{E_A}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{294} \right) \right] \cdot \left(\frac{t_0}{t} \right)^\alpha \cdot t} \quad (3.13)$$

Il valore di C_i varia in funzione della profondità di carbonatazione, ma può ritenersi costante nel copriferro completamente carbonatato (al termine della fase di innesco).

Del resto anche la velocità di corrosione delle armature varia in funzione della concentrazione di cloruri presenti nel calcestruzzo in corrispondenza della superficie della barra d'armatura. Anzi eventuali piccoli tenori di cloruri presenti in quantità di gran lunga inferiori alla concentrazione critica, e quindi di per sé insufficienti ad innescare corrosione per pitting (XS), risultano gravemente dannosi nel caso di avanzamento di carbonatazione: la velocità di corrosione, per esempio, può più che raddoppiare per umidità relativa al 50% se la concentrazione dei cloruri passa dallo 0% allo 0,4% (Figura 3.7).

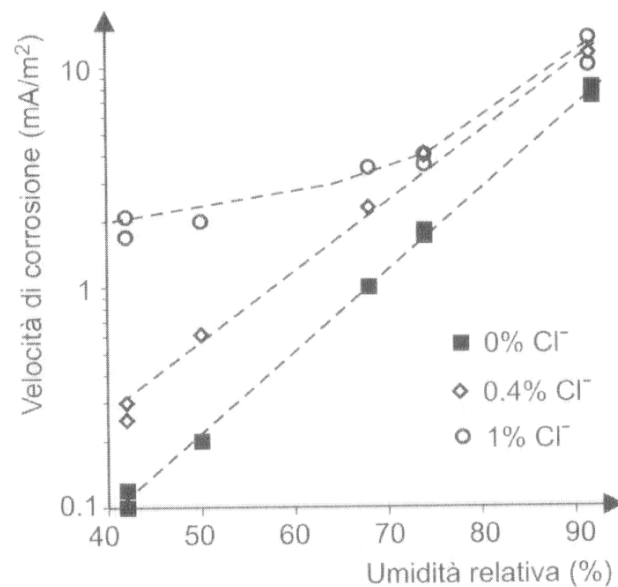


Figura 3.7 Variazione della velocità di corrosione in presenza di Cl^- [4]

Capitolo 4

L'approccio probabilistico

4.1 IL MODELLO PROPOSTO

Nel secondo capitolo sono stati esaminati in generale tutti i processi di degrado che colpiscono il calcestruzzo armato mentre nel terzo capitolo sono stati esaminati con maggior dettaglio i processi che degradano il calcestruzzo e inducono la corrosione delle barre d'armatura (ambienti XS e XC). Per tali condizioni, quindi, sono state ricavate le leggi che descrivono la cinetica di penetrazione degli agenti aggressivi (relazioni 3.8, 3.12 e 3.13).

L'approccio seguito nel terzo capitolo è, però, di tipo deterministico in quanto nei modelli considerati vengono fissati univocamente tutti i parametri introdotti, in funzione delle condizioni al contorno, e si ricava univocamente il dato di progetto (*il copriferro*) in funzione della variabile tempo (*vita utile di progetto*). In generale, però, i processi analizzati seguono andamenti *stocastici* ed è, quindi, più corretto considerare il risultato della modellazione non già come valore univocamente determinato, bensì come il più probabile tra una distribuzione di valori. In Figura 4.1 il concetto è illustrato graficamente facendo riferimento agli andamenti nel tempo delle *Sollecitazioni* e delle

Resistenze agenti su una struttura, ma vale in senso generale se i grafici vengono riferiti rispettivamente alla *Domanda* e alla *Capacità* del sistema.

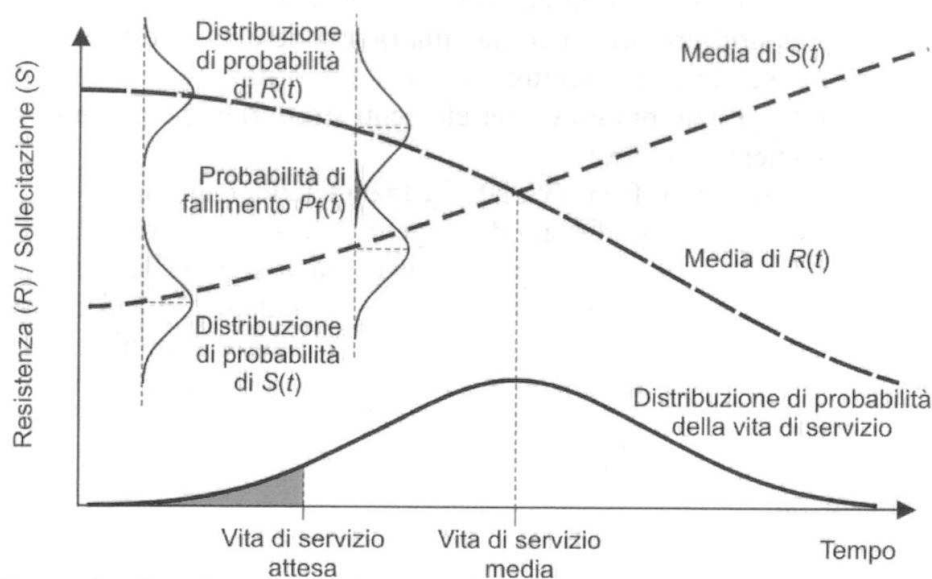


Figura 4.1 Evoluzione nel tempo delle funzioni $R(t)$ e $S(t)$

Le ordinate dei punti delle curve rappresentano i valori medi delle relative distribuzioni di probabilità corrispondenti al tempo indicato dall'ascissa. Nella figura sono considerate distribuzioni normali. Secondo questo approccio il punto di intersezione delle due curve, che rappresenta il tempo oltre il quale la Domanda supera la Capacità del sistema, non è il valore della Vita di servizio, bensì ne rappresenta il valore medio o anche il più probabile. Infatti per valori del tempo inferiori esiste la probabilità, seppure bassa, che si verifichi il fallimento rappresentato dall'area di intersezione delle due distribuzioni di probabilità di R e di S (*convoluzione*).

La curva riportata in basso nel grafico, quindi, rappresenta la distribuzione di probabilità della vita di servizio (distribuzione normale). La forma della

curva rappresenta, in termini pratici, l'attendibilità del risultato atteso, o anche l'affidabilità del risultato.

In termini statistici, e considerando il caso reale in cui sia R che S dipendono da più variabili, il concetto può sinteticamente esprimersi come:

$$p\{failure\} = p_f = p \{R(x_1, x_2, \dots) - S(y_1, y_2, \dots) < 0\} < p_{target}$$

Nel caso specifico relativo ai modelli di penetrazione dei cloruri e di propagazione della carbonatazione le funzioni R ed S rappresentano rispettivamente la capacità di resistenza alla penetrazione degli agenti aggressivi e la velocità di penetrazione degli stessi.

Le variabili $x_1, x_2, y_1, y_2, \dots$ presenti nei modelli rappresentano, invece, i parametri già introdotti nelle espressioni del terzo capitolo che caratterizzano il materiale (rapporto a/c, tipo di legante, fattore d'età, tipo di armatura) e le condizioni ambientali (sottoclasse di esposizione, temperatura, umidità).

La valutazione di tali parametri non è di rapida definizione, anche perché come già visto al paragrafo 3.1.1, non esistono delle procedure riconosciute a livello internazionale per le prove di misura o, se esistono, possono dare risultati non aderenti alla realtà. Per ridurre dunque la possibilità di errore, o almeno per riconoscere l'entità dell'errore che si commette, si può considerare il valore da assumere per ciascun parametro del modello non come un valore ben determinato, bensì come il valore più probabile di una distribuzione che, per il caso in oggetto, può ritenersi normale (*alla Gauss*) nella maggior parte dei casi [5].

Le ricerche più recenti (e in realtà le uniche) condotte nel settore a livello internazionale hanno seguito tale strada, dapprima impostando un approccio

semiprobabilistico, molto simile all'approccio che ha introdotto in Italia la progettazione agli stati limite, e poi completamente probabilistico.

In ordine cronologico, i principali codici presenti in letteratura sono:

- RILEM TC 136 CSL: Durability design of concrete structures (1994)
- ACI COMMITTEE 365: Service-Life Prediction—State-of-the-Art Report (2000)
- BRITE EuRam: DuraCrete – Probabilistic Performance based Durability Design of Concrete Structures (2000)
- LIFECON: Life Cycle Management of Concrete Infrastructures for Improved Sustainability (2003)
- fib (CEB-FIP) International Federation for Structural Concrete: Bulletin n.34 (2006)

Nel presente studio si fa riferimento al Bulletin n.34 del fib (CEB-FIP) che oltre ad essere il più recente è anche il più completo.

Per ogni parametro, quindi, si avrà una coppia di valori: il valore medio (N) e la deviazione standard (σ) che oltre a definire il valore più probabile per il parametro forniscono anche una misura dell'affidabilità del valore considerato (la forma della curva di Gauss).

Nelle tabelle seguenti sono riportati alcuni dei valori considerati:

D_o ($\cdot 10^{-12}$)	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60
CEM I		8.9	10.0	15.8	19.7	25.0
CEM I + FA (5%)		5.6	6.9	9.0	10.9	14.9
CEM I + SF(22%)	4.4	4.8			5.3	
CEM III (d'altoforno)		1.4	1.9	2.8	3.0	3.4
CEM II/L (al calcare)			(13; 2.6)			

Tabella 4.1 Valori dei coefficienti di diffusione

per alcuni tipi di cemento e al variare del rapporto a/c

Tipo Armatura	C_{cr}	Normale	Deviazione
Sensibile	Al carbonio	0.60	0.15
Poco sensibil e	Zincate	1.20	0.30
	Inox 1.4307	5.00	0.50
	Inox 1.4462	8.00	0.50

**Tabella 4.2 Valori della Concentrazione Critica di Cloruri
in funzione del tipo di armatura**

C_s	XS1 (aria)	XS2 (sommerso)	XS3(spruzzi)
CEM I	2.57; 0.36	10.3; 0.71	7.76; 1.36
CEM I + SF	3.23; 0.24	12.5; 1.54	8.96; 1.74
CEM II (di miscela con loppa)	3.05; 0.75	5.06; 0.66	6.77; 0.28
CEM II (di miscela alla pozzolana)	4.42; 0.75	10.8; 1.86	7.46; 0.32

**Tabella 4.3 Valori della Concentrazione Superficiale di cloruri
per alcuni tipi di cemento e per le 3 sottoclassi di XS**

$1/R_{acc} (*10^{-11})$	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60
CEM I		3.1	5.2	6.8	9.8	13.4
CEM I + FA (5%)		0.3	1.9	2.4	6.5	8.3
CEM I + SF(22%)	3.5	5.5			16.5	
CEM III		8.3	16.9	26.6	44.3	80.0

**Tabella 4.4 Valori della Resistenza alla Carbonatazione
per alcuni tipi di cemento e al variare del rapporto a/c**

Combinando opportunamente le coppie (N, σ) scelte di volta in volta in funzioni di tutte le condizioni al contorno che definiscono il problema, i modelli deterministici illustrati al terzo capitolo possono essere impiegati con

approccio probabilistico applicando le procedure di simulazione previste dal metodo Monte Carlo.

4.2 APPLICAZIONE DELL'ANALISI MONTE CARLO

Il Metodo Monte Carlo fa parte della famiglia dei metodi statistici non parametrici. Le possibili applicazioni del metodo spaziano dal campo della matematica, per il calcolo di aree e la risoluzione di integrali definiti, a quello dell'economia, per la valutazione dei rischi connessi a possibili scenari finanziari. È utile, inoltre, per superare i problemi computazionali legati ai test esatti che per grandi campioni generano un numero di permutazioni eccessivo.

In quest'ultimo caso rientra l'applicazione del metodo Monte Carlo impiegata nel presente lavoro. Per comprendere la dimensione del problema esaminato si consideri che se si volessero svolgere test dal vero per la definizione, ad esempio, della penetrazione dei cloruri nel calcestruzzo tenendo conto almeno di alcuni fondamentali parametri quali:

- tipo di cemento: I, II, III, IV, V (25 sottotipi)
- rapporto a/c: 0,35-0,55 (almeno 5 valori con intervalli di 0.5)
- condizioni Ambientali XS (3 sottoclassi)
- temperatura 0°-35° C (almeno 8 valori, con intervalli di 5°C)
- vita utile fino a 50 anni (almeno 11 valori, uno ogni 5 anni)

si dovrebbero eseguire almeno 30.000 provini e considerare tempi di osservazione lunghi fino a 50 anni. E' ciò comunque non garantirebbe una cospicua popolazioni di valori, in termini statistici.

Da qui l'esigenza di adottare procedure di simulazioni per la generazione di numeri pseudocasuali: l'analisi Monte Carlo si basa su un algoritmo che

genera una serie di numeri tra loro incorrelati, che seguono la distribuzione di probabilità che si suppone abbia il fenomeno da indagare, cercando di esplorare in modo denso tutto lo spazio dei parametri del fenomeno. I valori restituiti, quindi, costituiscono popolazioni di numeri validi in quanto seguono la legge di distribuzione associata alla coppia (N, σ) fornita in input.

L'efficienza di questo metodo aumenta rispetto agli altri metodi quando la dimensione del problema cresce.

L'algoritmo principale per la generazione di numeri pseudocasuali (*PRNG pseudo random number generator*) è quello proposto da Park e Miller:

$$X_{k+1} = a \cdot X_k \bmod(m)$$

con

$$a = 75 \quad \text{e} \quad m = 2^{31} - 1$$

L'algoritmo proposto da Park e Miller è stato implementato in linguaggio C come segue:

```
#define a 16807
#define m 2147483647
#define q (m / a)
#define r (m % a)
static long int seed = 1;
long int PMrand()
{
    long int hi = seed / q;
    long int lo = seed % q;
```

```
long int test = a * lo - r * hi;  
if(test > 0)  
    seed = test;  
else    seed = test + m;  
return seed;  
}
```

Nella formulazione pratica del presente lavoro è stato impiegato il componente aggiuntivo del pacchetto Office per la generazione di numeri casuali, che utilizza l'algoritmo appena descritto (Figura 4.2)

Generazione di un numero casuale

Numero di variabili: 1 OK

Numero di numeri casuali: 1.000.000 Annulla

Distribuzione: Normale ?

Parametri

Media = 0

Deviazione standard = 1

Generatore: 1

Opzioni di output

☐ Intervallo di output:

☒ Nuovo foglio di lavoro:

☐ Nuova cartella di lavoro

Figura 4.2 Parametri di scelta per la generazione di numeri casuali con Excel

E' possibile definire il numero di variabili ed il numero di numeri casuali da generare, il tipo di distribuzione con i relativi parametri ed il generatore (*seed*) per controllare la ripetizione dei valori.

Il modello proposto, dunque, utilizza la procedura di generazione di n numeri casuali che restituisce per ogni parametro, e per le condizioni al contorno fissate in progetto, un insieme di n valori normal-distribuiti. Tali valori vengono impiegati nei modelli deterministici descritti al terzo capitolo (relazioni 3.8, 3.12 e 3.13) che restituiscono n^i risultati, dove i rappresenta il numero di parametri considerati variabili ($i=1$ nel caso in cui i parametri sono indipendenti tra loro). I risultati ottenuti vengono poi trattati con procedure di analisi statistica per ottenere non più un unico e determinato risultato finale, bensì il più probabile tra quelli considerati. Del resto se tutti i parametri sono indipendenti, e rappresentabili da distribuzioni normali, anche la popolazione dei risultati sarà rappresentata da una distribuzione normale.

Il modello proposto, cioè, permette di combinare le leggi deterministiche con l'elevato numero di variabili grazie a simulazioni di pseudo-test e restituisce la stima della vita utile dell'elemento in c.a. in termini di probabilità e deviazione standard; la Figura 4.3 ne schematizza i passaggi logici.

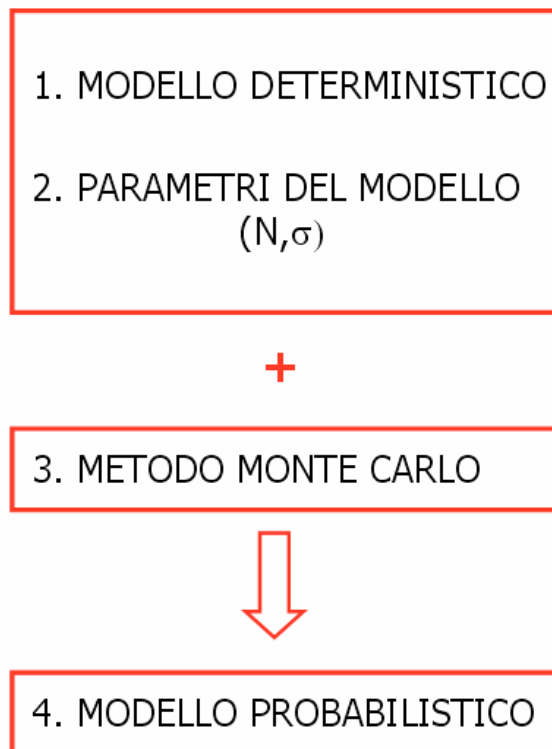


Figura 4.3 Schematizzazione del modello proposto

4.3 CONFRONTO TRA IL MODELLO DETERMINISTICO ED IL MODELLO PROBABILISTICO

Nel presente paragrafo si analizzano alcuni casi esemplificativi per confrontare i risultati ottenuti impiegando il modello probabilistico proposto con quelli ottenuti, per le medesime condizioni, con il relativo modello deterministico.

A differenza di quest'ultimo il modello proposto non fornisce un unico valore determinato per il risultato indagato, bensì la stima del suo valore più probabile e della relativa deviazione standard.

L'impiego dei livelli di confidenza nell'analisi statistica permette di controllare l'entità dell'errore commesso: scegliendo valori più alti per i livelli di confidenza aumenta, come prevedibile, lo scarto tra i valori minimi e massimi intorno al valore medio, in quanto maggiore è la probabilità che il risultato sia interno all'intervallo. Ciò equivale, per intervalli più stretti, ad ammettere probabilità più basse e quindi una previsione meno accurata (Figura 4.4).

In ogni caso in tutti i grafici riportati di seguito è evidente come i risultati ottenuti dall'applicazione del modello deterministico siano sottostimati rispetto a quelli ottenuti applicando il modello proposto.

Inoltre lo scarto riscontrato tra i due modelli aumenta per condizioni più severe e per valori maggiori richiesti per la vita utile di progetto, ovvero proprio per quelle strutture per le quali è richiesta una migliore protezione dagli agenti aggressivi.

Figura 4.4

Andamento degli intervalli di confidenza per X_c
per CEM I; $\alpha/c=0,40$; Armatura zincata; XS1; 20°C

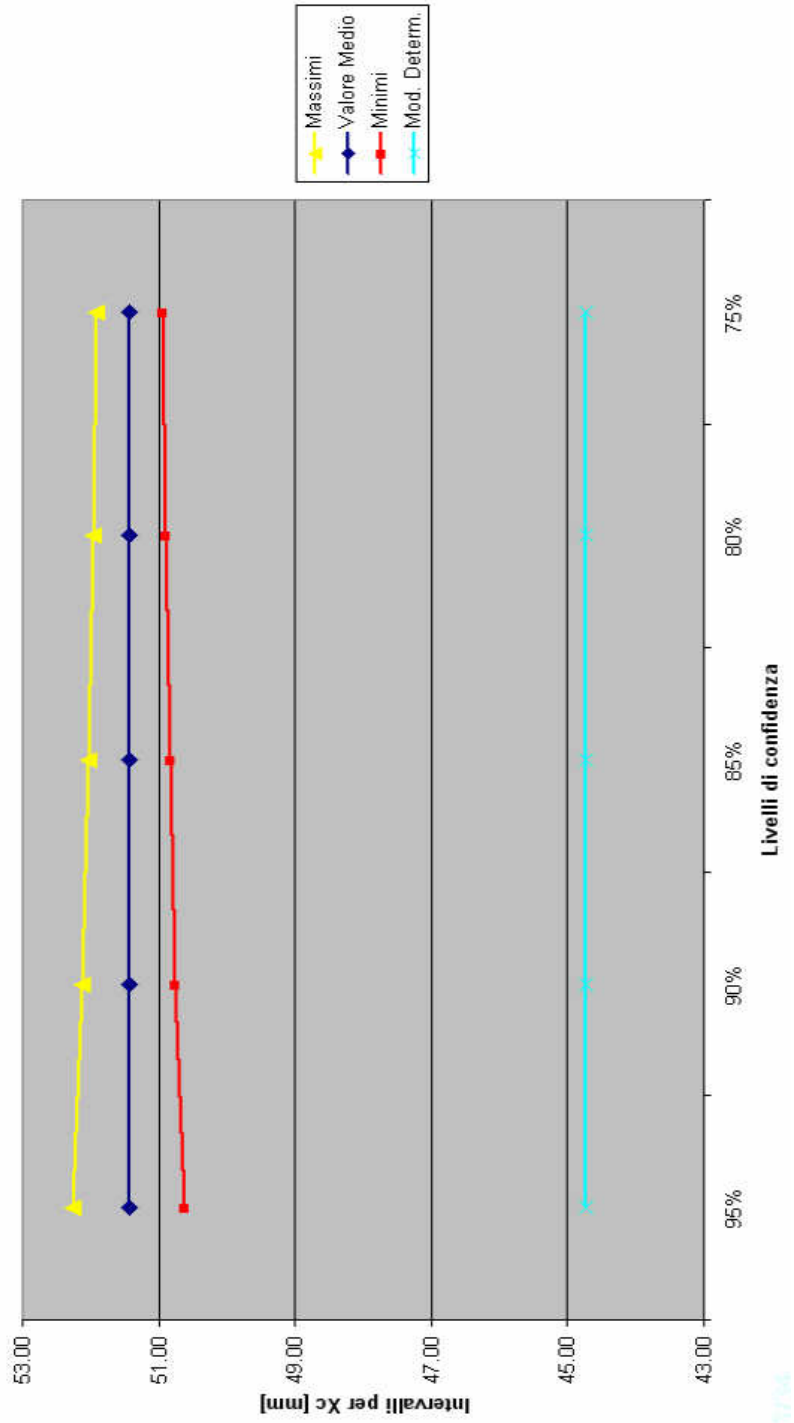


Figura 4.5
Confronto tra modello deterministico e modello stocastico per
CEM I; $a/c=0,40$; Armatura sensibile; XS1; 20°C

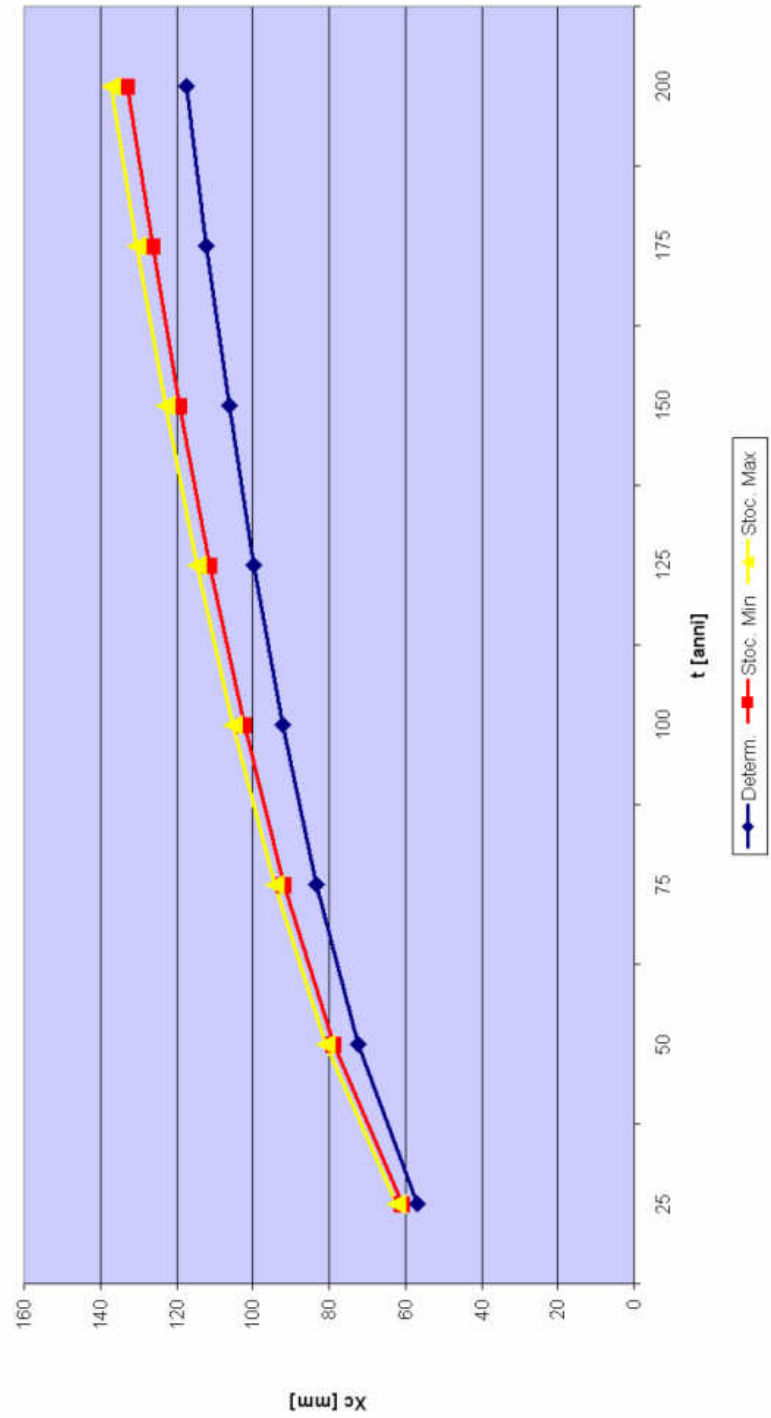


Figura 4.6
Confronto tra modello deterministico e modello stocastico per
CEM III; $a/c=0,40$; Armatura sensibile; XS1; 20°C

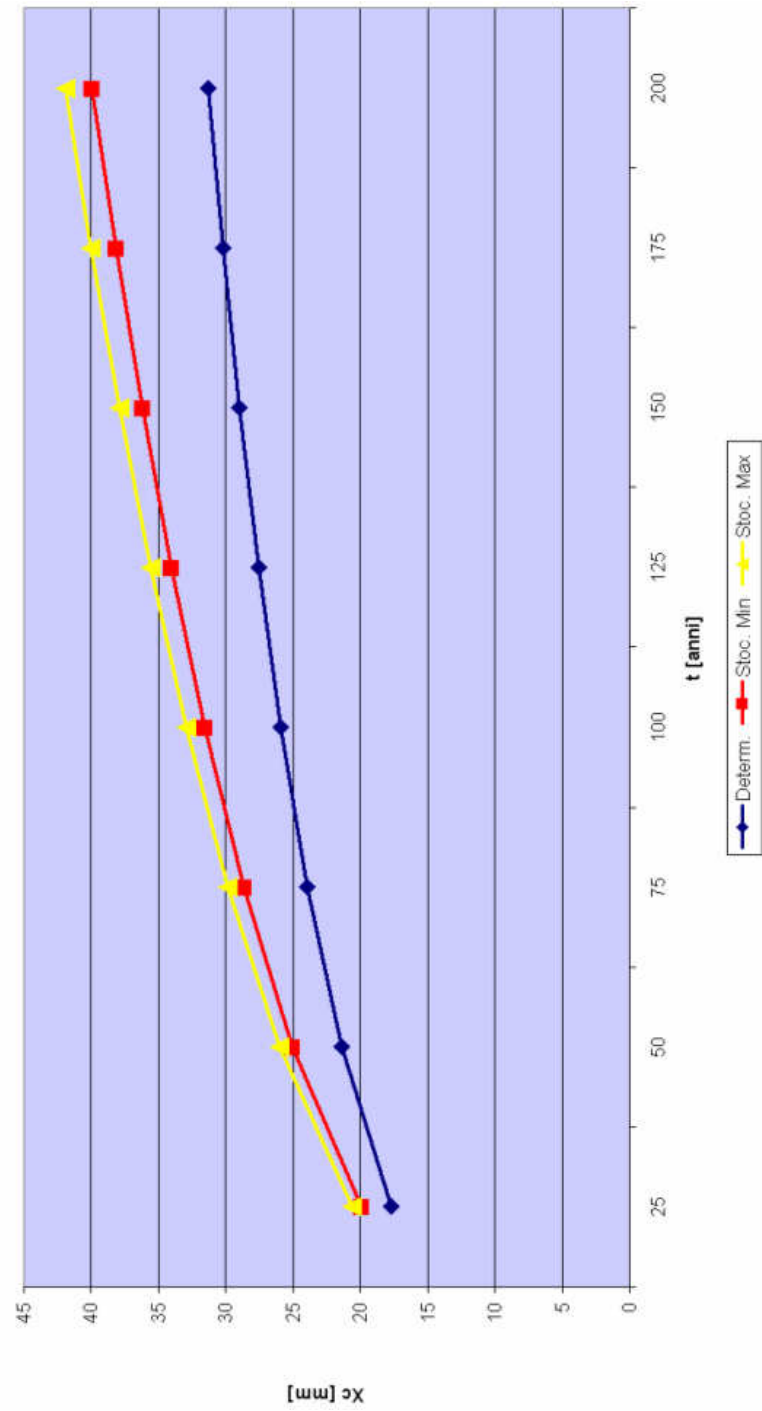
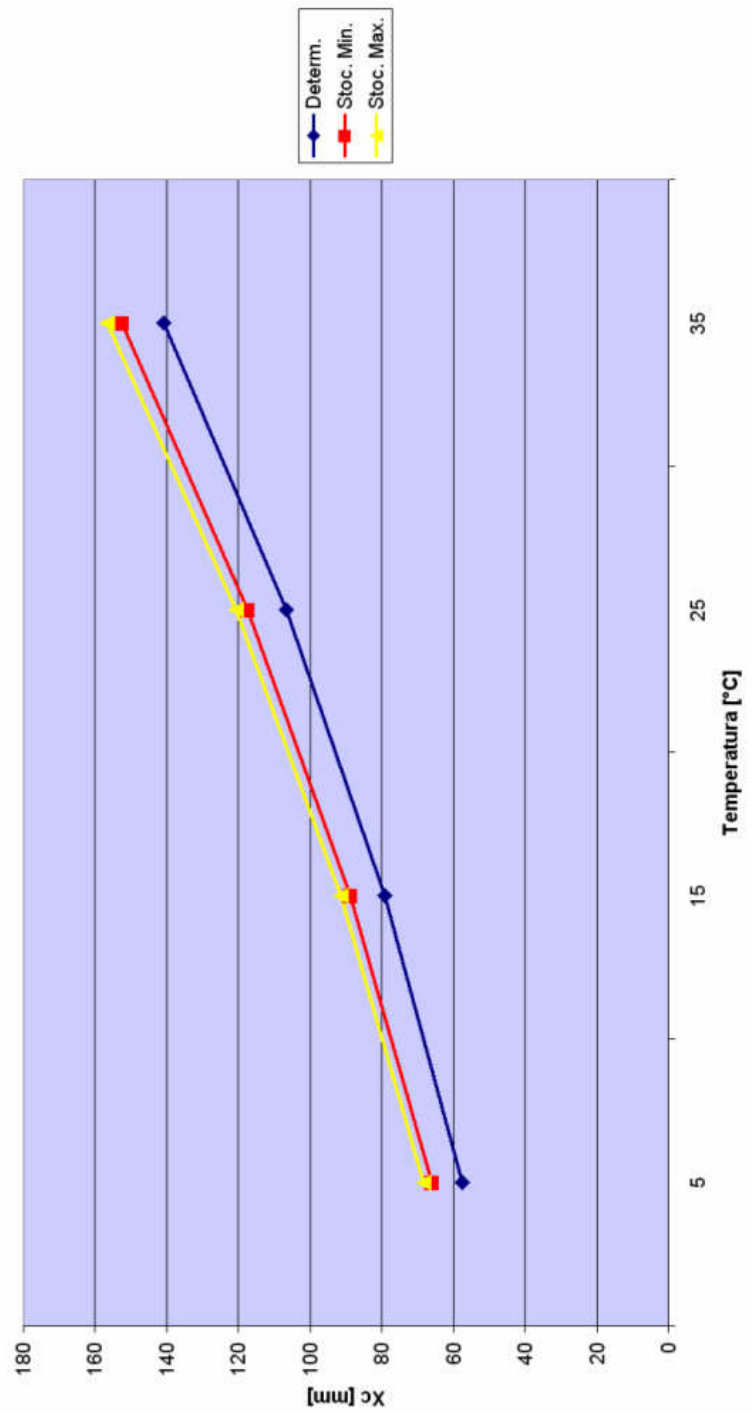


Figura 4.7
Confronto tra modello deterministico e modello stocastico per
CEM I; $a/c=0,40$; Armatura sensibile; XS1; $V_u=100$ anni



Capitolo 5

Impiego del modello proposto

5.1 PROGETTO DEL COPRIFERRO DI STRUTTURE IN C.A.

Il principale scopo del modello proposto è quello di fornire uno strumento di immediato utilizzo per la progettazione di calcestruzzi armati durevoli.

Per tale scopo le modellazioni esposte al quarto capitolo sono state tradotte in una procedura automatica che permette di ottenere in modo rapido e semplice, e sia in termini numerici che grafici, i risultati delle scelte progettuali effettuate.

Associando, inoltre, al valore medio trovato il livello di confidenza scelto dal progettista durante l'analisi statistica, in genere 95% e quindi per un frattile al 5%, si concretizza la possibilità di attuare un approccio prestazionale, piuttosto che prescrittivistico, per il progetto del copriferro associato alla vita utile attesa (Service Life Design) degli elementi strutturali in c.a.

Lo strumento, quindi, può essere anche utilizzato per simulare diversi scenari e confrontare i risultati ottenuti adottando diversi accorgimenti e lasciando invariate le altre variabili (tipo di cemento, rapporto a/c,...).

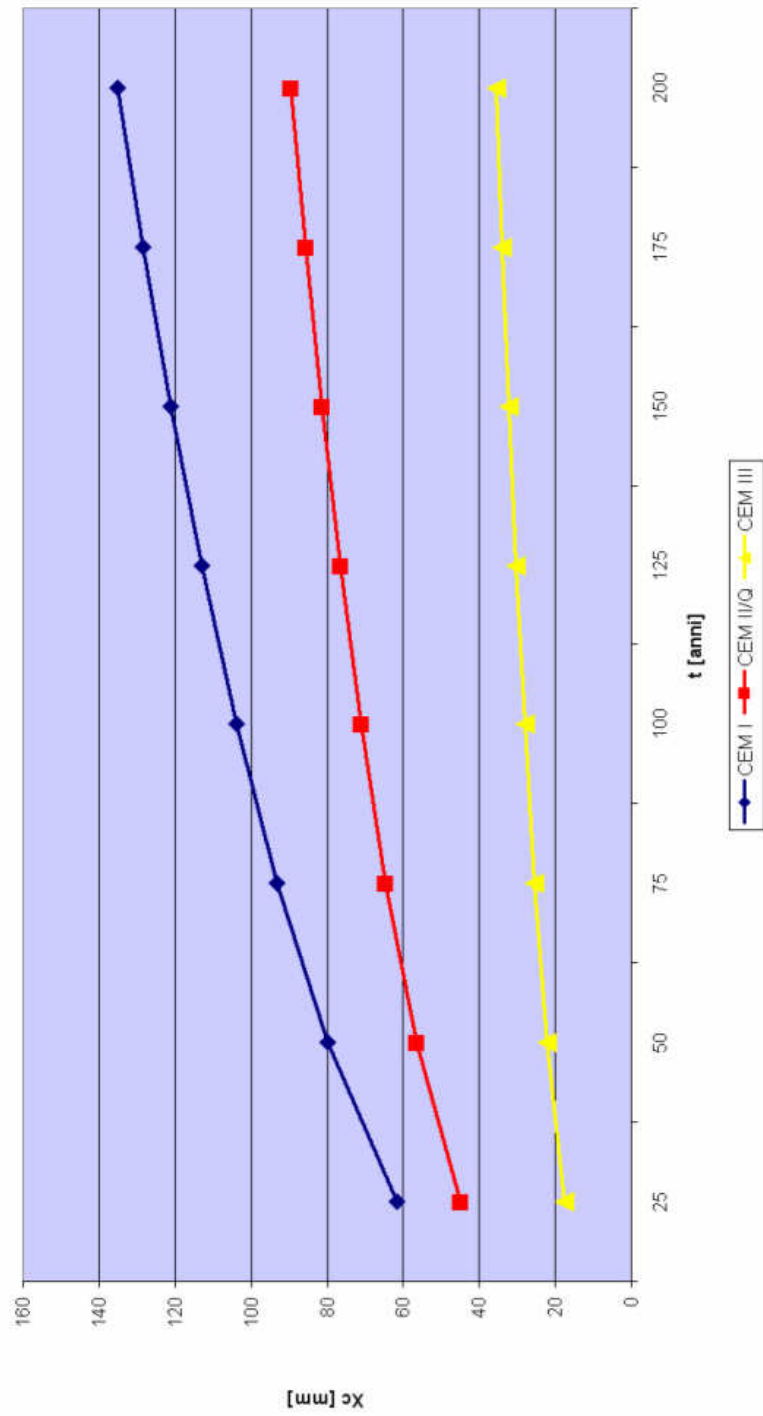
La procedura è stata lasciata aperta per permettere all'utente che, conoscendo più approfonditamente gli argomenti trattati, voglia intervenire sulle distribuzioni normali di partenza o per eventuali sviluppi futuri della ricerca nel campo dei test dal vero.

I confronti tra le diverse scelte progettuali possono essere eseguiti in modo rapido dalla lettura dei grafici restituiti:

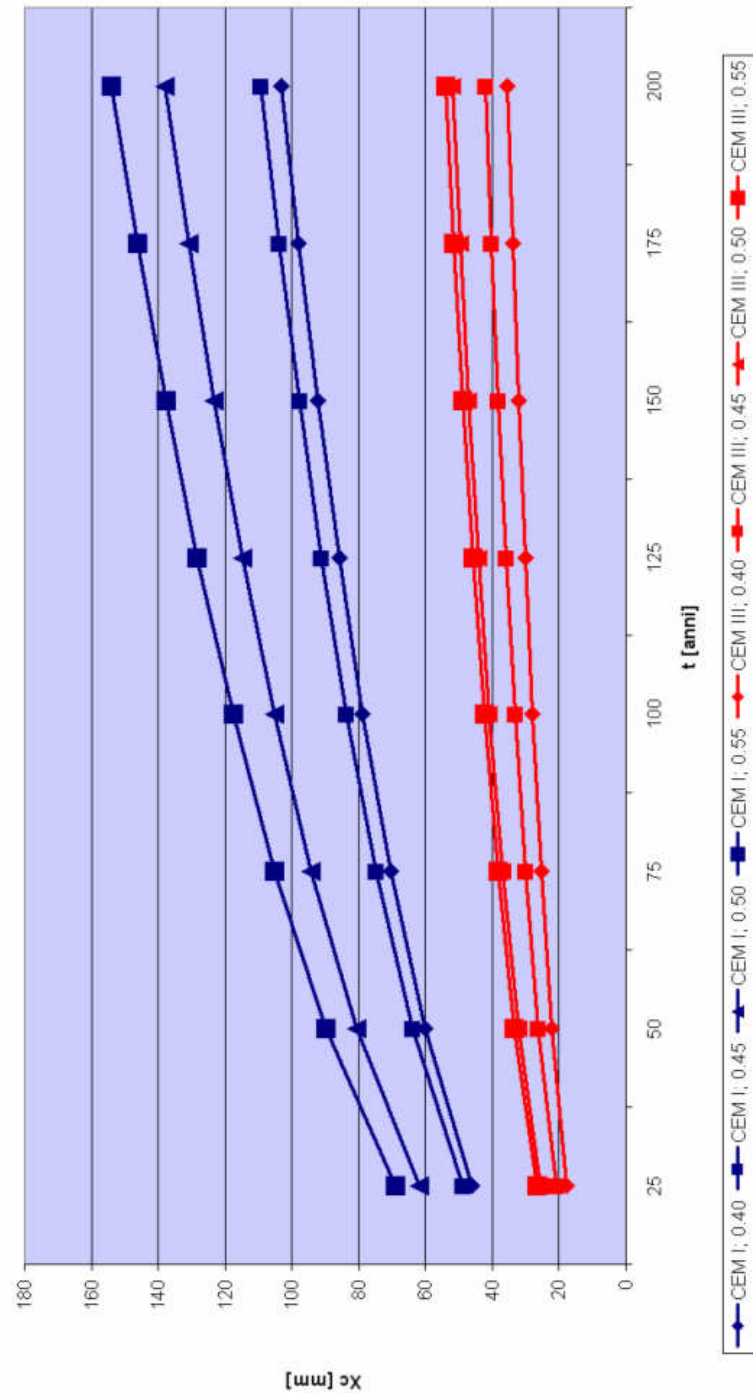
- a) leggendo in ascissa la vita utile di riferimento è possibile confrontare i diversi valori forniti per il copriferro da adottare per le diverse condizioni impostate;
- b) leggendo in ordinata il copriferro considerato è possibile confrontare i diversi valori di vita utile garantita al variare delle condizioni impostate.

A titolo di esempio si riportano di seguito alcuni grafici comparativi che mostrano, tra l'altro, come migliorino le prestazioni di durabilità se vengono utilizzati calcestruzzi meno porosi, se vengono impiegate armature meno sensibili e scelti cementi d'altoforno, o con aggiunte, rispetto ai cementi Portland.

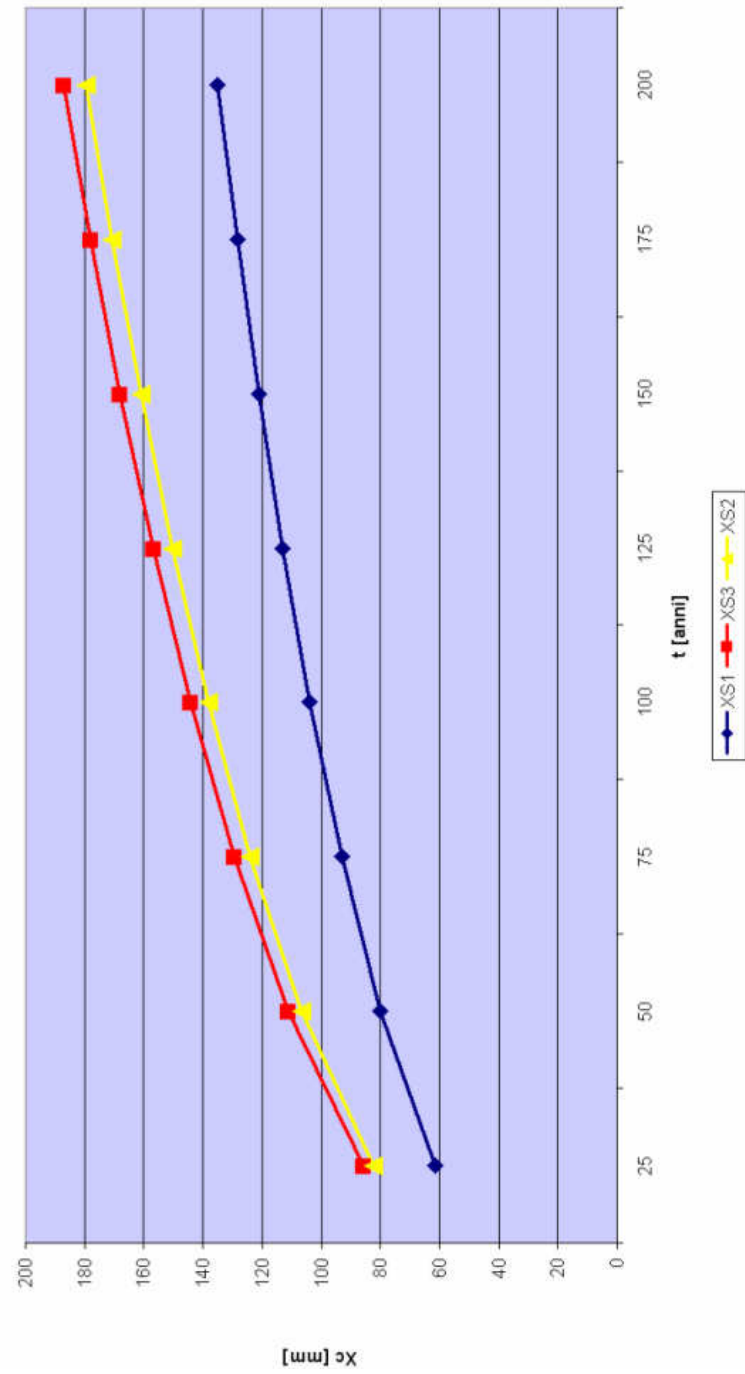
Confronto del copriferro di progetto per diversi tipi di cemento
con $a/c=0.40$; Armatura sensibile; XS1; 20°C



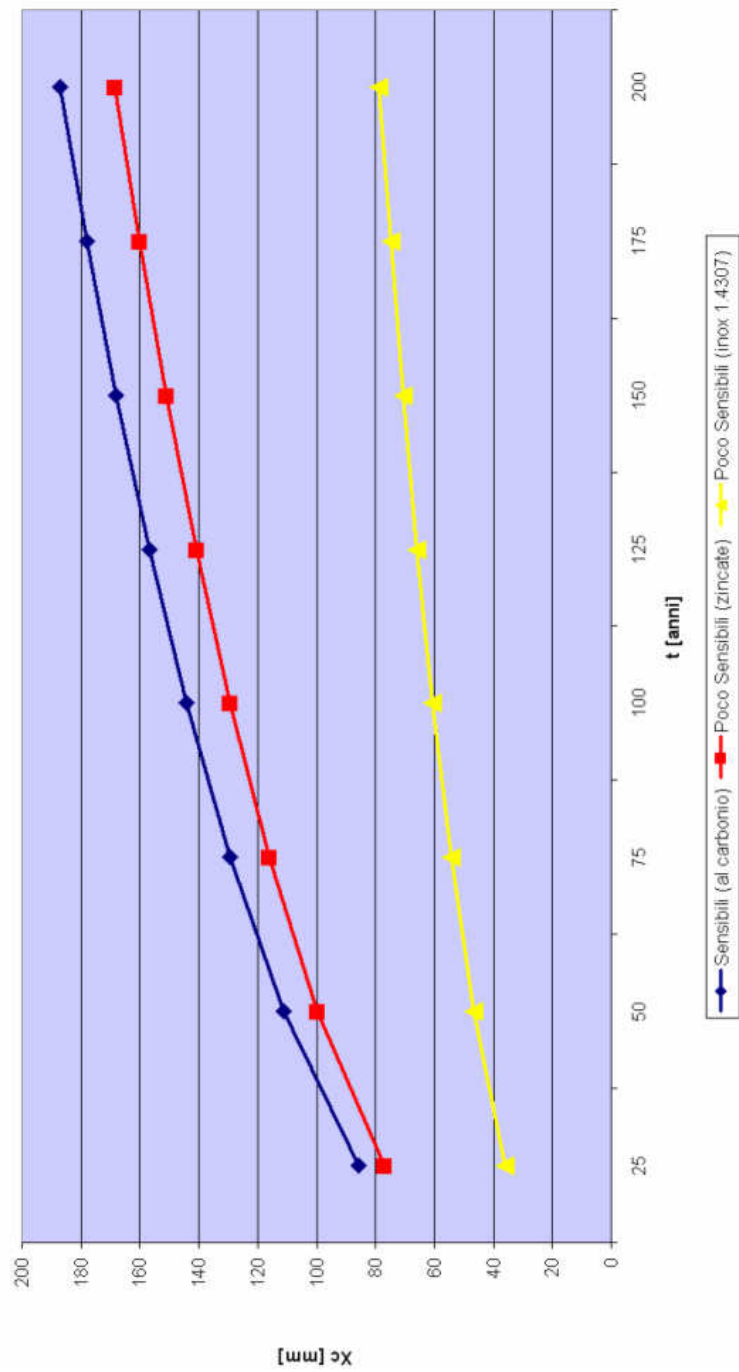
Confronto del copriferro di progetto per diversi rapporti a/c
per CEM I e CEM III; Armatura sensibile; XS1; 20°C



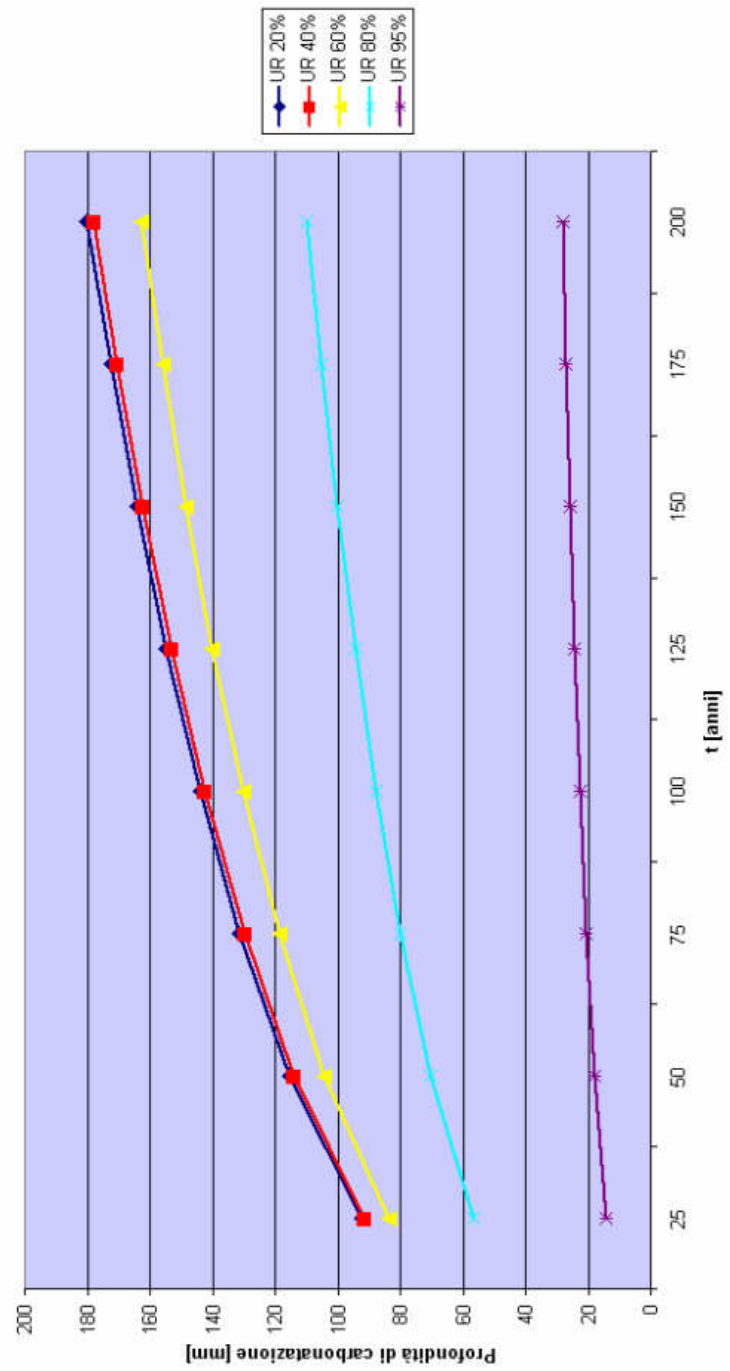
Confronto del copriferro di progetto per XS1, XS2 e XS3
per CEM I; $a/c=0,40$; Armatura sensibile; 20°C



Confronto del copriferro di progetto per diverse armature
per CEM I; $a/c=0,40$; XS3; 20°C



Andamenti della profondità di carbonatazione nel tempo
per diverse percentuali di umidità relativa per CEM I; $a/c=0,40$; XC; 20°C



5.2 VALUTAZIONE DELLA VITA UTILE RESIDUA DI STRUTTURE ESISTENTI IN C.A.

Dalle relazioni riportate nel terzo e nel quarto capitolo sono state ricavate le espressioni inverse che forniscono la variabile t in funzione del copriferro x_c .

La procedura automatica inversa si applica, quindi, a strutture esistenti integrata dall'utilizzo di strumenti di diagnostica non invasiva (pachometro): partendo dalla misura del copriferro dell'elemento indagato e considerate le opportune condizioni ambientali e al contorno è possibile stimarne, sempre con approccio probabilistico, la vita utile residua dell'elemento indagato.

In questa ottica è possibile programmare gli eventuali interventi di manutenzione in modo più rapido, efficace ed economico e soprattutto con una elevata probabilità di successo nella scelta del momento opportuno in cui intervenire.

5.3 PREVENZIONE E PROTEZIONE PER LE STRUTTURE IN C.A.

La principale opera di prevenzione per una struttura in c.a. esposta ad agenti aggressivi è una corretta progettazione. E' fondamentale in tal senso l'assunzione di consapevolezza che i rischi ai quali sarà esposta l'opera possono talvolta richiedere limitazioni e prescrizioni anche più restrittive di quelle derivanti, ad esempio, dai carichi o dai sovraccarichi.

Ma molto spesso non è sufficiente una corretta progettazione per scongiurare i rischi connessi al degrado del materiale: gli errori e le omissioni (*manomissioni*) riscontrabili durante l'esecuzione dell'opera possono vanificare i buoni propositi seguiti in fase di corretta progettazione.

Tralasciando in questo ambito i tipi di protezione del c.a. come i trattamenti superficiali e similari si vuole porre l'attenzione in questo paragrafo sulle tipologie di intervento strettamente collegate agli argomenti trattati in questo studio, poiché il modello proposto ai capitoli precedenti può essere utilmente impiegato anche in tal senso. Tra questi metodi, allora, sicuramente meritano un cenno quelli che prevedono la *ripassivazione delle armature* o la *riduzione del contenuto di umidità nel calcestruzzo*.

Nel primo caso si interviene su calcestruzzi carbonatati ristabilendo le condizioni di alcalinità intorno alle barre di armatura, ripassivandole, sostituendo lo spessore di calcestruzzo interessato da una malta cementizia priva di cloruri (metodo convenzionale).

Nel secondo caso si interviene controllando che l'umidità relativa sia inferiore al 70%; infatti se il calcestruzzo è asciutto la velocità di corrosione

delle armature resta molto bassa anche se il fronte carbonatato ha raggiunto la superficie della barra. In teoria tale metodo può essere impiegato per ridurre la velocità di corrosione anche nel caso di calcestruzzi contaminati da cloruri.

Entrambi i metodi esposti, però, fanno ricorso a interventi convenzionali che si articolano in quattro fasi:

- Analisi del degrado;
- Rimozione del calcestruzzo contaminato;
- Pulizia delle armature esposte;
- Ricostruzione del copriferro.

Occorre quindi intervenire con metodi piuttosto invasivi e molto spesso anche costosi. Diverso è il caso delle tecniche di intervento elettrochimiche.

5.3.1. *Tecniche elettrochimiche*

Queste tecniche alternative permettono di ripassivare le armature senza dover necessariamente eliminare lo spessore di calcestruzzo carbonatato o con concentrazione critica di cloruri. Le tecniche elettrochimiche si basano sull'applicazione di una corrente alle armature e possono distinguersi in:

- a) protezione catodica;
- b) rialcalizzazione elettrochimica;
- c) rimozione elettrochimica dei cloruri.

Capitolo 6

Conclusioni

La vita utile di un elemento in c.a. dipende da numerosi fattori, sostanzialmente variabili in funzione del tipo di cemento, del rapporto a/c, delle condizioni ambientali, temperatura, umidità, età del cls.

L'elevata quantità di possibili combinazioni da analizzare e la natura stocastica dei processi affrontati ha spinto a trattare il problema in termini probabilistici, partendo da modelli deterministici desunti dalle semplici leggi di trasporto di specie nel calcestruzzo.

Il modello proposto permette di combinare le leggi deterministiche desunte per gli ambienti XS, XC (e combinati) grazie a simulazioni di pseudo-test mediante analisi Monte Carlo.

Il modello restituisce, con approccio probabilistico, la stima della vita utile dell'elemento in c.a. in termini di probabilità e intervallo di confidenza, in genere 95% e quindi per un frattile del 5%;

L'implementazione in runtime permette un utilizzo immediato del modello stocastico proposto, che si rivolge anche a tecnici non specializzati; tuttavia è

sufficiente modificare le coppie (N, σ) che definiscono i parametri variabili per intervenire sul modello, ad esempio con integrazioni con successivi test al vero.

L'applicazione del modello a strutture esistenti permette una rapida ed efficace pianificazione degli interventi di manutenzione e della relativa programmazione dei costi.

6.1 SVILUPPI FUTURI

Lo studio condotto con la presente ricerca rappresenta un primo passo per la definizione, calibrazione e divulgazione di un modello prestazionale per l'analisi del degrado delle strutture in c.a.

Tra gli obiettivi del modello che è stato proposto vi è anche quello di sensibilizzare maggiormente gli operatori del settore, i progettisti in particolar modo, verso gli aspetti del degrado. Lo strumento fornito vuole essere contemporaneamente semplice ma efficace e di rapida applicazione.

Tuttavia, a causa anche della complessiva dei modelli matematici analizzati, il presente studio ha riguardato solo gli attacchi associati alle classi di esposizione XS e XC, che comunque risultano essere i più pericolosi per il calcestruzzo armato.

Sviluppi futuri della presente ricerca possono, quindi, essere:

- Calibrazione delle coppie (N, σ) assunte per i parametri, attraverso campagne di test al vero;
- Estensione del modello proposto implementando, con analogo approccio probabilistico, la corrosione che interessa le armature.

